

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 1 (11), май, 2022

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — для организаций.
Свидетельство о регистрации средств массовой информации № 1533 от 30.07.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г. № 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ» серия «Технические науки» включён в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ» включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском, белорусском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор П. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодку

Подписано в печать 04.05.2022. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 8,60.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское областное унитарное полиграфическое предприятие «Слонимская типография».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014. Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 г. Слоним, Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (гл. ред. журн.), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Белорусской инженерной академии, академик Международной академии технического образования, академик Международной академии наук педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (гл. ред. сер.), лауреат Государственной премии Республики Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Дубень И. В.** (отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных систем»), кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь); **Белый А. В.**, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь); **Дремук В. А.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**, доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клочков А. В.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клубович В. В.**, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь); **Томило В. А.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational Institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — for companies.
The certificate of the registration of mass media № 1533
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation
Commission of the Republic of Belarus from January 21,
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU
Herald. Engineering Series" is included into the List of
scientific publications of the Republic of Belarus for
publishing the results of theses research on engineering
sciences (mechanical engineering and machines,
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian, Belorussian and English. The journal is
distributed on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 04.05.2022. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 13,25.
Acc.-pub. s. l. 8,60. Circulation of 100 copies.
Order . Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A. V.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Громыко П. Н., Хатетовский С. Н., Макацария Д. Ю., Макаревич А. С. Обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов

Жигалов А. Н., Горавский И. А. Экспериментальные исследования микроструктуры быстрорежущей стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом

Малеронок В. В., Кушнеров А. В., Алифанов А. В. Влияние магнитно-импульсной обработки на фазовые переходы в поверхностном слое режущего осевого инструмента из инструментальной стали

Налиуко А. І., Русан С. І., Сіваченко Л. А., Сіваченко Т. Л. Методика наближеного аналізу силового взаємодіяння у здрабнювальних машинах са щоткаподобними зв'язками

Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Корольков А. С. Исследование эксплуатационных показателей синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях легковых автомобилей

Фадин Ю. М., Шеметова О. М. Использование пневмосмесительного оборудования для производства сухих строительных смесей

Шматов А. А. Характер упрочнения твердых сплавов при термо-гидрохимической обработке

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Бондарев С. Н. Определение потребной мощности на процесс машинного доения коровы

Китун А. В., Передня В. И., Крупенин П. Ю., Филатов В. Г., Дубень И. В. Исследование процесса измельчения кормов плоскостным роторным измельчающим аппаратом вертикального типа

Китун А. В., Передня В. И., Крупенин П. Ю., Филатов В. Г., Дубень И. В. Оптимизация выбора оборудования линии первичной обработки молока

Китун А. В., Швед И. М. Определение параметров участка размыва осадка в навозохранилище направленным действием струи жидкого навоза

Пузевич К. Л., Коцуба В. И., Пузевич В. В., Филиппов А. И. Агрегаты для посева сельскохозяйственных культур под мульчирующую пленку

Шаршунов В. А., Курзенков С. В., Левчук В. А., Цайц М. В. Исследование характера деформации и разрушения семенной коробочки льна

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Gromyko P. N., Khatetovsky S. N., Makatsaryia D. Yu., Makarevich A. S. Provision of the satellite translational motion during the operation of eccentric transmission with parallel arrangement of input and output shafts

14 Jigalov A. N., Goravskii I. A. Experimental investigations of the high-speed steel P6M5 microstructure hardened by the aerodynamic sound method

24 Maleronok V. V., Kushnerov A. V., Alifanov A. V. The effect of magnetic pulse processing on phase transitions in the surface layer of a cutting axial tool of tool steel

31 Naliuko O. I., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Sivachenko T. L. Method of approximate analysis of force interaction in grinding machines with brush-like links

37 Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Korolkov A. S. Research of performance of synthetic motor oils indicators used in gasoline engines of passenger cars

43 Fadin Yu. M., Shemetova O. M. The use of pneumatic mixing equipment for the dry building mixes production

48 Shmatov A. A. The nature of hard alloys hardening during thermo-hydrochemical treatment

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

55 Bondarev S. N. Determination of the required power for the machine cow milking process

65 Kitun A. V., Perednya V. I., Krupenin P. Y., Filatov V. G., Duben I. V. Research of grinding feed process by a planar vertical rotary grinder

74 Kitun A. V., Perednya V. I., Krupenin P. Y., Filatov V. G., Duben I. V. Optimization of the equipment choice for a primary milk processing line

81 Kitun A. V., Shved I. M. Determination of the sediment erosion area parameters in the manure storage by the directed action of a liquid manure jet

88 Puzevich K. L., Kotsuba V. I., Puzevich V. V., Filippov A. I. Aggregates for sowing agricultural crops under mulching film

96 Sharshunov V. A., Kurzenkov S. V., Levchuk V. A., Tsaitis M. V. Investigation of the nature of flax seedpods deformation and destruction

УДК 621.833

П. Н. Громыко¹, доктор технических наук, профессор,
С. Н. Хатетовский¹, кандидат технических наук, доцент,
Д. Ю. Макацария², кандидат технических наук, доцент,
А. С. Макаревич¹

¹Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет», пр-т Мира, 43, 212000 Могилев, Республика Беларусь

²Учреждение образования «Могилевский институт Министерства внутренних дел Республики Беларусь»,
ул. Крупской, 67, 212011 Могилев, Республика Беларусь, grom7@tut.by

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ САТЕЛЛИТА ПРИ РАБОТЕ ЭКСЦЕНТРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ВХОДНОГО И ВЫХОДНОГО ВАЛОВ

В статье показана структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов. Рассмотрен случай, когда ее работоспособность теряется при определенном значении угла поворота входного вала. Аналитические исследования показали, что обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов возможно только при наличии дополнительного кривошипа, причем данный дополнительный кривошип должен составлять с сателлитом вращательную пару, а его ось вращения должна быть параллельна оси вращения основного кривошипа. Следует также отметить, что параметры эксцентрика нового дополнительного кривошипа должны соответствовать параметрам эксцентрика основного кривошипа.

Исследования, проведенные с использованием компьютерного моделирования, показали, что эксцентриковые передачи с параллельным расположением входного и выходного валов имеют уровень основных эксплуатационных показателей, аналогичный эксцентриковым передачам с соосным расположением входного и выходного валов.

Ключевые слова: дополнительный кривошип; компьютерное моделирование; параллельное расположение входного и выходных валов; поступательное движение сателлита; работоспособность; угол поворота; эксцентриковая передача.

Рис. 10. Библиогр.: 8 назв.

P. N. Gromyko¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
S. N. Khatetovsky¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
D. Yu. Makatsaryia², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. S. Makarevich¹

¹Interstate Educational Institution of Higher Education “Belarusian-Russian University”, 43 Mira Ave.,
212000 Mogilev, the Republic of Belarus

²Educational Institution “Mogilev Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus”,
67 Krupskoj Str., 212011 Mogilev, the Republic of Belarus, grom7@tut.by

PROVISION OF THE SATELLITE TRANSLATIONAL MOTION DURING THE OPERATION OF ECCENTRIC TRANSMISSION WITH PARALLEL ARRANGEMENT OF INPUT AND OUTPUT SHAFTS

The article shows a block diagram of eccentric transmission with parallel arrangement of input and output shafts. The case when its operability is lost at a certain value of the angle of rotation of the input shaft is considered. Analytical studies have shown that the provision of translational motion of the satellite during the operation of an eccentric trans-

mission with a parallel arrangement of the input and output shafts is possible only if there is an additional crank. Besides, this additional crank must make a rotating pair with the satellite, and its axis of rotation must be parallel to the axis of the main crank rotation. It should also be noted that the eccentric parameters of the new additional crank must correspond to the eccentric parameters of the main crank.

Studies conducted using computer simulations have shown that eccentric transmissions with parallel arrangement of input and output shafts have a level of basic performance similar to eccentric transmissions with coaxial arrangement of input and output shafts.

Key words: additional crank; computer modeling; parallel arrangement of input and output shafts; translational satellite motion; operability; rotation angle; eccentric transmission.

Fig. 10. Ref.: 8 titles.

Введение. Передачи с параллельным расположением входного и выходного валов (ременные, цепные) известны давно [1; 2]. Отличительной особенностью рассматриваемого варианта эксцентриковой передачи является возможность трансформировать вращение с относительно большими по величине значениями коэффициента редуцирования за счет осуществления жестких конструкций сопрягаемых звеньев. Структурные схемы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов предложены в работах [3; 4].

При обеспечении поступательного движения сателлита в процессе работы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов возникает случай, когда ее работоспособность теряется в определенный момент. В целях осуществления функционирования эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов предложена конструкция с дополнительным новым кривошипом, позволяющим устранить функционирование передачи в критическом ее состоянии.

На основе приведенных аналитических выражений, а также разработанной компьютерной модели предлагаемого варианта эксцентриковой передачи было сделано заключение об ее полной работоспособности при осуществлении поступательного движения сателлита.

Разработанная эксцентриковая передача с параллельным расположением входного и выходного валов благодаря конструкции, включающей дополнительный кривошип, имеет основные эксплуатационные показатели на уровне эксцентриковой передачи с соосным расположением указанных валов и может быть использована во многих отраслях народного хозяйства.

Материалы и методы исследования. Методы исследования структурной схемы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов без дополнительного кривошипа. Рассмотрим представленный на рисунке 1 базовый вариант эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов без дополнительного кривошипа [5].

Планетарная эксцентриковая передача содержит корпус 1, основной кривошип 2, размещенный на входном валу 3 и приводящийся во вращение двигателем 4, дополнительный кривошип 5 с осью вращения 15, которая параллельна оси вращения основного кривошипа 2. На выходном валу 8 эксцентриковой передачи закреплено центральное колесо 12 с внутренним зубчатым венцом, которое входит в зацепление с наружным зубчатым венцом 14. Зубчатый венец 14 расположен на сателлите 7, который совершает поступательное движение за счет наличия двух вращательных пар, соединяющих отверстия сателлита 7 с основным 2 и дополнительным 5 кривошипами.

В основном кривошипе 2 и в дополнительном кривошипе 5 возникают опорные реакции R_A и R_B , которые можно разложить на составляющие вдоль осей X и Y , т. е. R_{Ax} , R_{Ay} , R_{Bx} и R_{By} . Следует отметить, что составляющие опорных реакций R_{Ax} , R_{Ay} определяются по моменту $M_{вх}$ двигателя 4, приводящего в движение входной вал 3. Для получения реакций R_{Bx} , R_{By} необходимо знать величину и направление активной силы N_k , создаваемой зубчатыми колесами 14 и 12 данной передачи.

На рисунке 2 изображен сателлит 7 при положении эксцентрика основного кривошипа A_1A_2 под углом β к оси A_1Y .

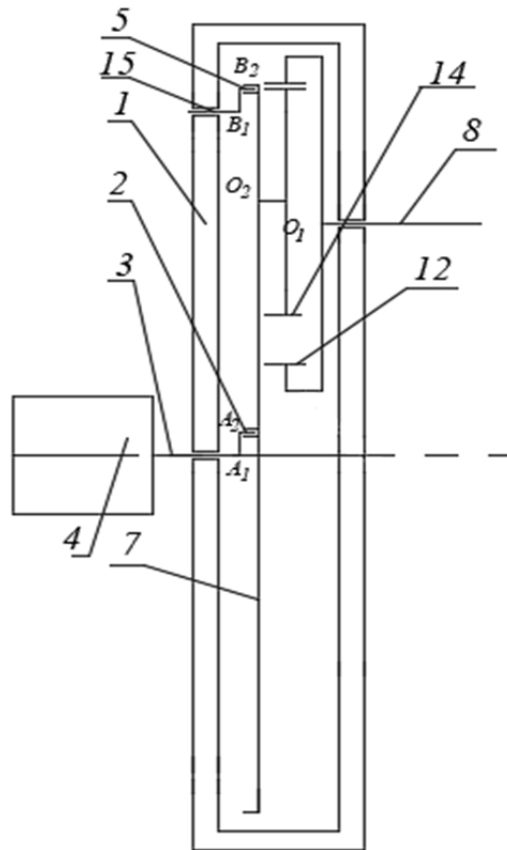


Рисунок 1. — Структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов

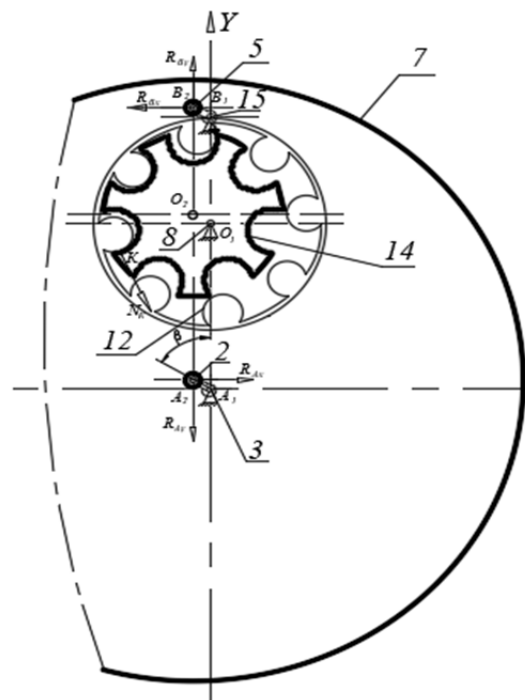


Рисунок 2. — Структурная схема сателлита 7 эксцентриковой передачи при расположении эксцентрика основного кривошипа A_1A_2 под углом β к оси A_1Y

Значение общей реакции R_{B2} , полученной из составляющих ее реакций R_{Bx} , R_{By} , определяется исходя из известных уравнений статики по известной активной силе N_k [6]:

$$R_{B2} = \frac{M_{вх}(r_{Ky} - e \cos \beta)z}{\sqrt{e^2 + (r_{Ky} - e \cos \beta)^2 + 2e(r_{Ky} - e \cos \beta) \cos \left(\beta + \frac{\beta}{z} \right)}} \times$$

$$\times \frac{(f_{трC2} \sin \alpha + \cos \alpha)}{\left(f_{трB2} \sin \left(\alpha + \arcsin \frac{e \sin \beta}{(r_{Ky} - e \cos \beta)} \right) + \cos \left(\alpha + \arcsin \frac{e \sin \beta}{(r_{Ky} - e \cos \beta)} \right) \right) r_B (\sin \beta + f_{трB2} \cos \beta)}, \quad (1)$$

где R_B — нормальная составляющая реакции в точке B ;
 $M_{вх}$ — входной момент эксцентриковой передачи;
 r_{Ky} — проекция вектора от точки K к точке A_1 на ось OY ;
 e — эксцентриситет, равный длине A_1A_2 ;
 β — угол поворота кривошипа A_1A_2 ;
 z — число зубьев сателлита;
 $f_{трC2}$ — коэффициент трения в точке C_2 ;
 α — угол поворота N_k относительно вертикальной оси;
 r_B — расстояние, определяющее длину A_2B_2 ;
 $f_{трB2}$ — коэффициент трения в точке B_2 [6].

На основе уравнения (1) построен график изменения значения реакции R_{B2} , в зависимости угла поворота кривошипа A_1A_2 (рисунок 3).

Используя полученную графическую зависимость значения реакции R_{B2} , можно заметить, что при углах, определяющих положение эксцентрика A_1A_2 основного кривошипа 2 к оси A_1Y , равных 0 и 180°, значение реакций R_{B2} изменяется и возрастает до значения 10 000 Н.

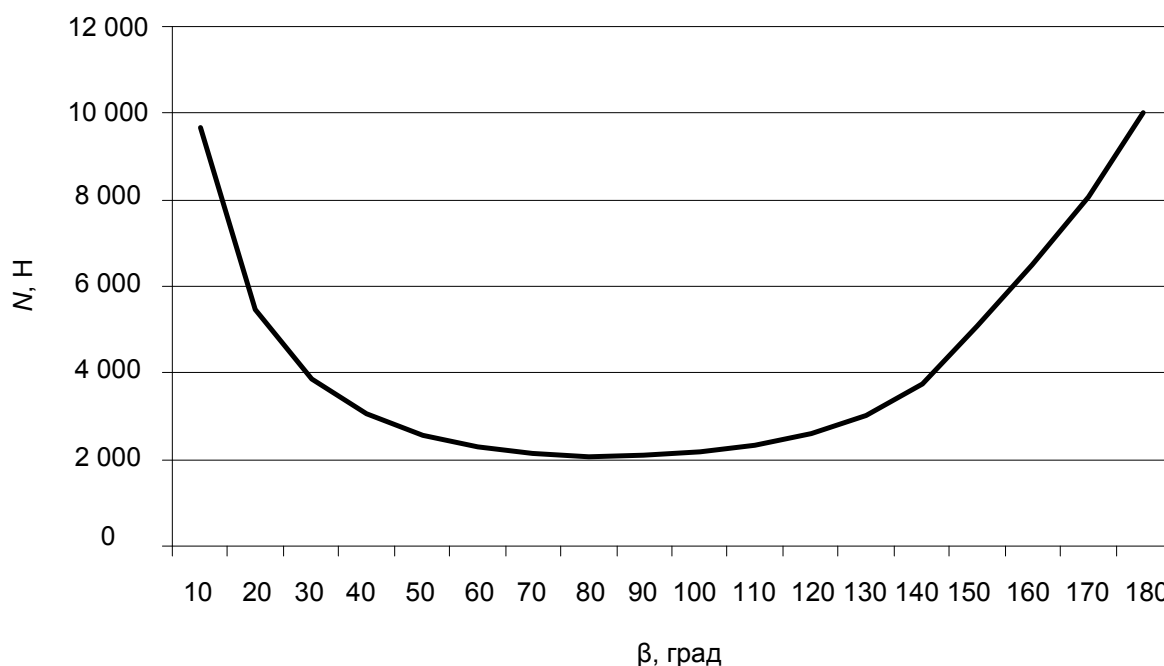


Рисунок 3. — Зависимость изменения значения реакции R_{B2} от угла β поворота кривошипа A_1A_2

Если угол β , определяющий положение эксцентрика A_1A_2 основного кривошипа 2, будет равен 0° (или же 180°), то вертикальная составляющая реакции R_{By} в точке B_2 будет отсутствовать (рисунок 4, а), т. е. в тот момент времени, когда эксцентриситет A_1A_2 основного кривошипа 2 расположен вдоль оси A_1Y , в точке B_2 вертикальная составляющая реакции R_{By} при изменении своего знака с плюса на минус должна быть равна нулю.

Для работы эксцентриковой передачи в этом случае сателлит 7 должен под действием активной силы N_K повернуться в обратном направлении своего движения (см. рисунок 4, б). При обратном повороте сателлита 7 в точке B_2 дополнительно к опорной реакции R_{Bx} снова добавляется опорная реакция R_{By} .

Таким образом, при заданном вращении эксцентрика основного кривошипа A_1A_2 сателлит 7 не совершает поступательного движения, т. е. эксцентриковая передача неработоспособна в момент времени, когда угол β , определяющий положение эксцентрика A_1A_2 основного кривошипа 2 к оси A_1Y , будет равен 0° (или же 180°). В данном случае механизм параллельных кривошипов, состоящий из сателлита 7 с кривошипами 2 и 5, находится в так называемой мертвой зоне.

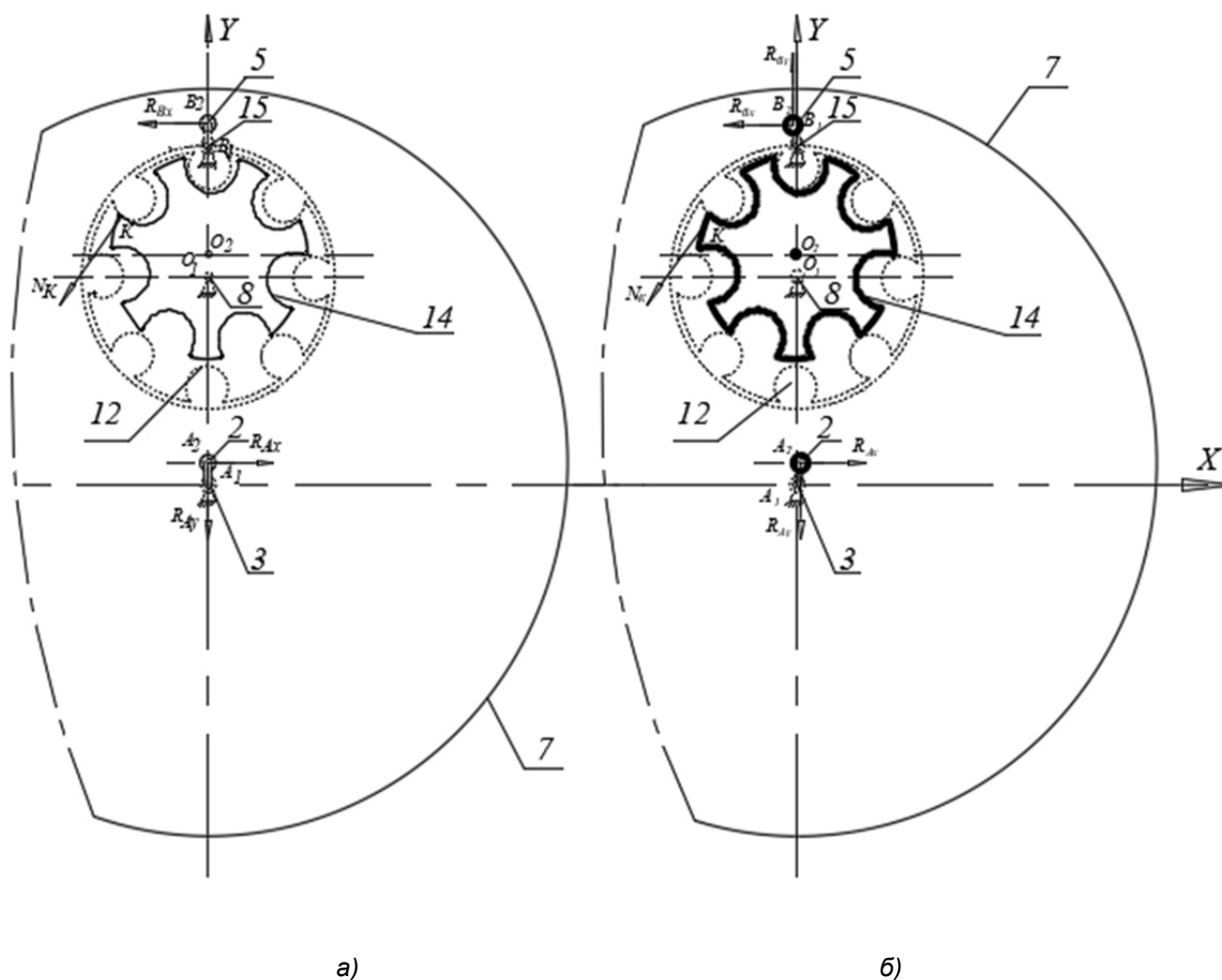


Рисунок 4. — Структурная схема сателлита 7 эксцентриковой передачи при расположении эксцентрика основного кривошипа A_1A_2 под углами β к оси A_1Y : а — при $\beta = 0$; б — при β , близком к нулевому значению

Методы исследования структурной схемы эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов при наличии дополнительного кривошипа. Чтобы осуществлялась нормальная работа эксцентриковой передачи при углах β , равных 0 или 180° , необходимо дополнить эксцентриковую передачу как минимум еще одним новым дополнительным кривошипом 6 (рисунок 5) [3].

Важно, чтобы ось вращения 16 не находилась в плоскости, проходящей через ось вращения 3 и ось вращения 15. Причем новый дополнительный кривошип 6 должен составлять с сателлитом 7 вращательную пару C_2 . Ось вращения нового дополнительного кривошипа 6 должна быть параллельна оси вращения основного кривошипа 2. Следует также отметить, что параметры эксцентрика C_1C_2 нового дополнительного кривошипа 6 должны равняться параметрам эксцентрика основного кривошипа A_1A_2 .

На рисунке 6, а, видно, что наличие нового дополнительного кривошипа 6 в случае поворота основного кривошипа 2 на угол β , который не отличается от углов 0 или 180° , позволяет дополнительно разгружать опоры как дополнительного 5, так и нового дополнительного 6 кривошипов, что способствует нормальной работе эксцентриковой передачи.

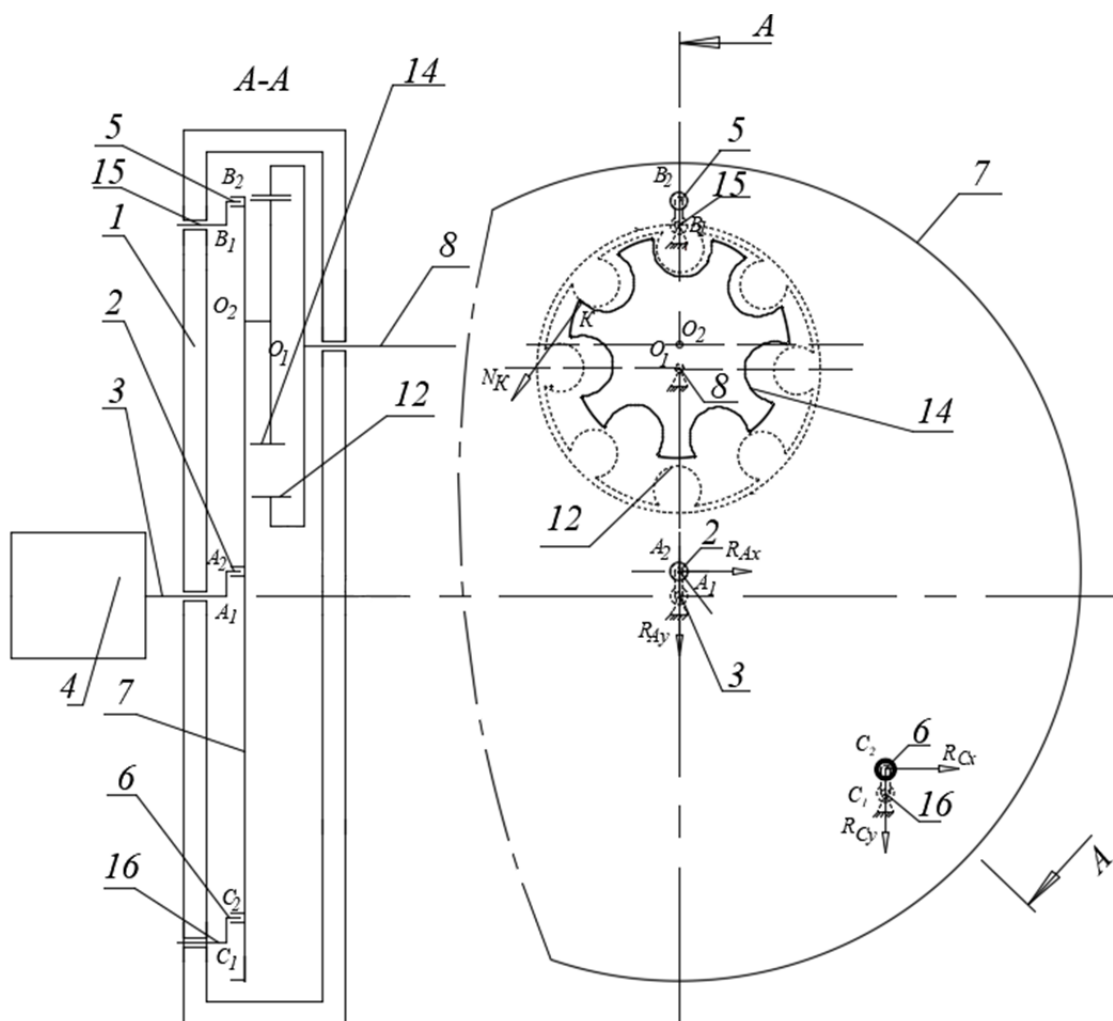


Рисунок 5. — Структурная схема эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с новым дополнительным кривошипным валом 6

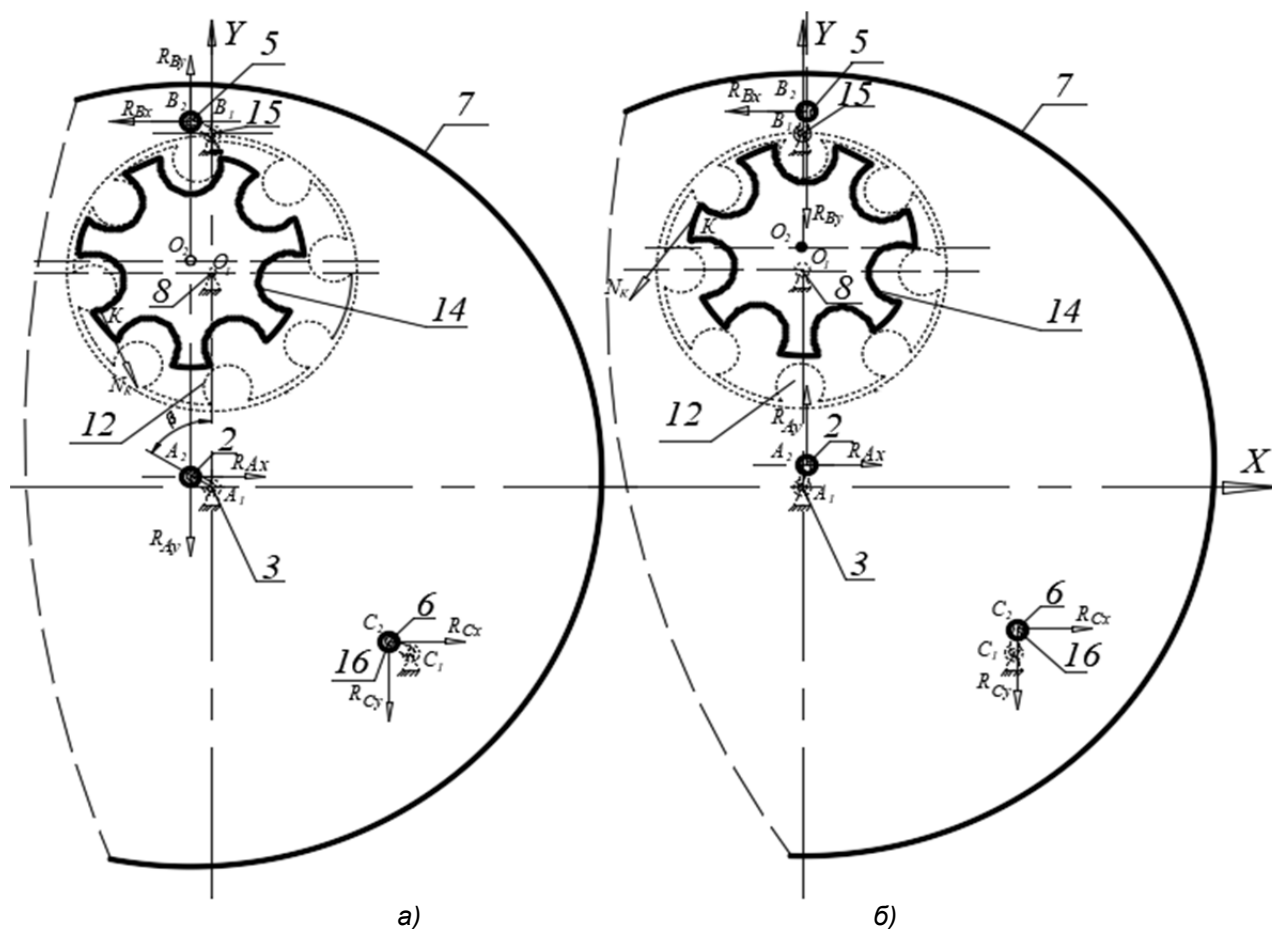


Рисунок 6. — Вариант эксцентриковой передачи с новым дополнительным кривошипным валом 6: а — при расположении эксцентрика основного кривошипа A_1A_2 под углом β к оси A_1Y ; б — нормальная работа эксцентриковой передачи при плоскопараллельном движении сателлита 7 в направлении движения основного эксцентрика A_1A_2

В случае, когда поворот основного кривошипа 2 будет осуществлен на угол β , равный углу 0° (или же 180°), несмотря на то, что вертикальная составляющая реакции R_{By} в точке B_2 дополнительного кривошипа 5 равна нулю, благодаря новому дополнительному кривошипу 6 сателлит 7 продолжит совершать плоскопараллельное движение (см. рисунок 6, б). Плоскопараллельное движение сателлита 7 не изменится, если все параллельные эксцентрики основного 2, дополнительного 5 и нового дополнительного кривошипов 6 совершат поворот на определенный угол относительно начального своего положения.

Следовательно, наличие как минимум одного нового дополнительного кривошипа 6 делает эксцентриковую передачу работоспособной по сравнению с первоначальным вариантом данной эксцентриковой передачи.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты исследований основных показателей эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов на основе компьютерных исследований. Для проведения анализа поступательного движения сателлита была разработана компьютерная модель эксцентриковой передачи (рисунок 7).

При вращении входного вала 1 с кривошипом 2 сателлит 3 за счет пары вращения между поверхностью кривошипа 2 и поверхностью отверстия сателлита 3 совершает поступательное движение. На сателлите 3 имеется еще один внутренний зубчатый венец 4, который контактирует с наружными зубьями центрального колеса 5. Для создания необходимого поступательного движения сателлита 3 предусмотрены дополнительные кривошипы 7 и 9, вращающиеся на валах 6 и 8.

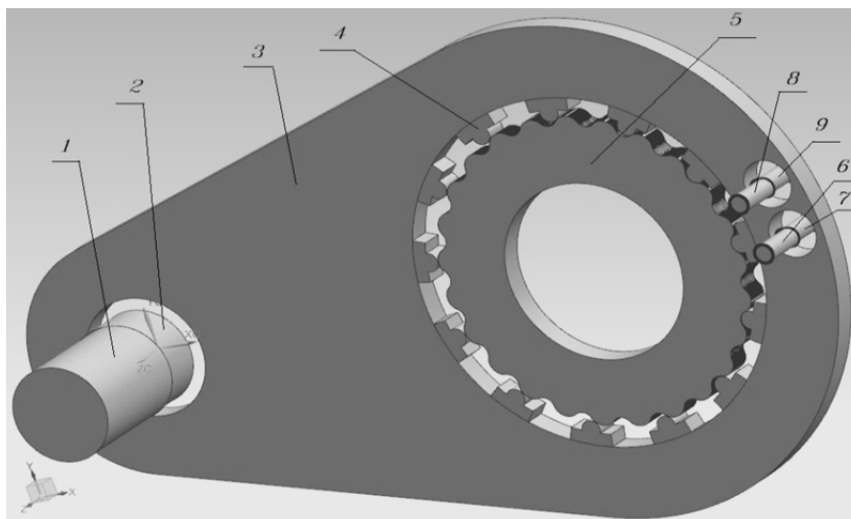


Рисунок 7. — Компьютерная модель эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов с дополнительными кривошипами 7 и 9, вращающимися на валах 6 и 8

Методика исследований эксцентриковых передач методами компьютерного моделирования рассмотрена в работе [7]. В целях определения параметров движения сателлита 3 была построена компьютерная модель.

В случае, когда связь между узлом вращения с дополнительным эксцентриком 9 и отверстием сателлита 3 не учитывается, в результате моделирования был построен график, показанный на рисунке 8. В данной компьютерной модели использовался вариант эксцентриковой передачи, рассмотренный на рисунках 1, 2. Результаты, отраженные на графике (см. рисунок 8), показывают изменение кинематической погрешности вращения выходного звена 5 от угла поворота входного вала 1. Данные результаты позволили сделать вывод о том, что при отсутствии дополнительного эксцентрика 9 наблюдается резкое изменение значения кинематической погрешности выходного звена 5, а затем ее заклинивание. Это подтверждает, что данный вариант эксцентриковой передачи неработоспособен.

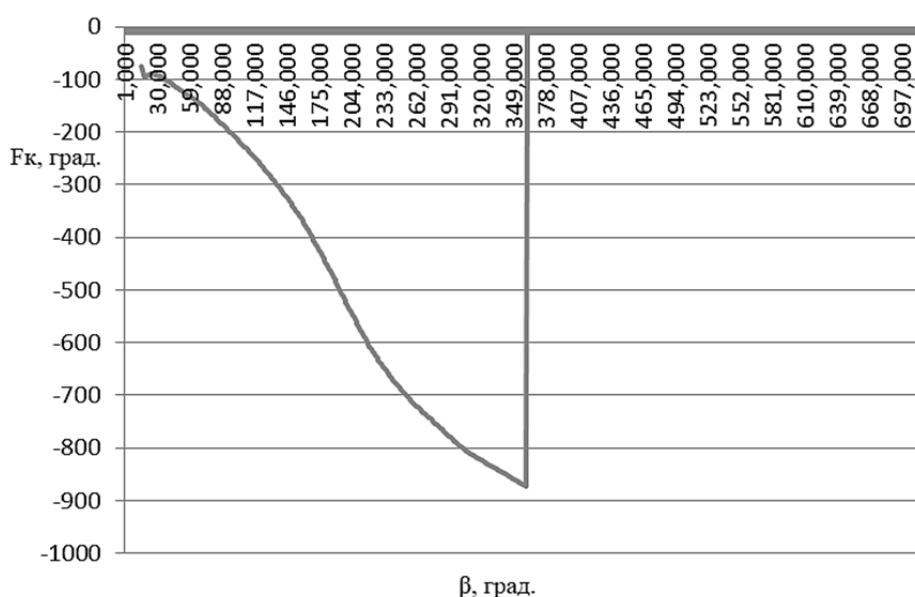


Рисунок 8. — Кинематическая погрешность выходного звена 5 от поворота входного вала при отсутствии связи между узлом вращения с дополнительным эксцентриком 9 и отверстием сателлита 3

В случае работы эксцентриковой передачи, имеющей новый дополнительный эксцентрик 9, получены графики, изображенные на рисунках 9, 10. В данном случае рассматривается вариант эксцентриковой передачи, показанной на рисунках 5, 6, в котором дополнительно включен новый дополнительный эксцентрик 9 с осью вращения 8.

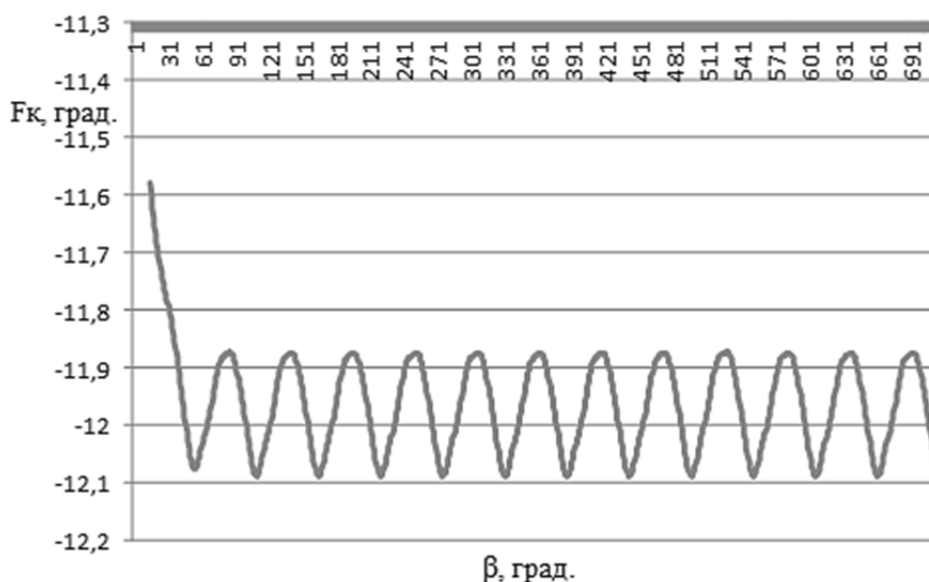


Рисунок 9. — Кинематическая погрешность выходного звена 5 от поворота входного вала при наличии связи между узлом вращения с дополнительным эксцентриком 9 и отверстием сателлита 3

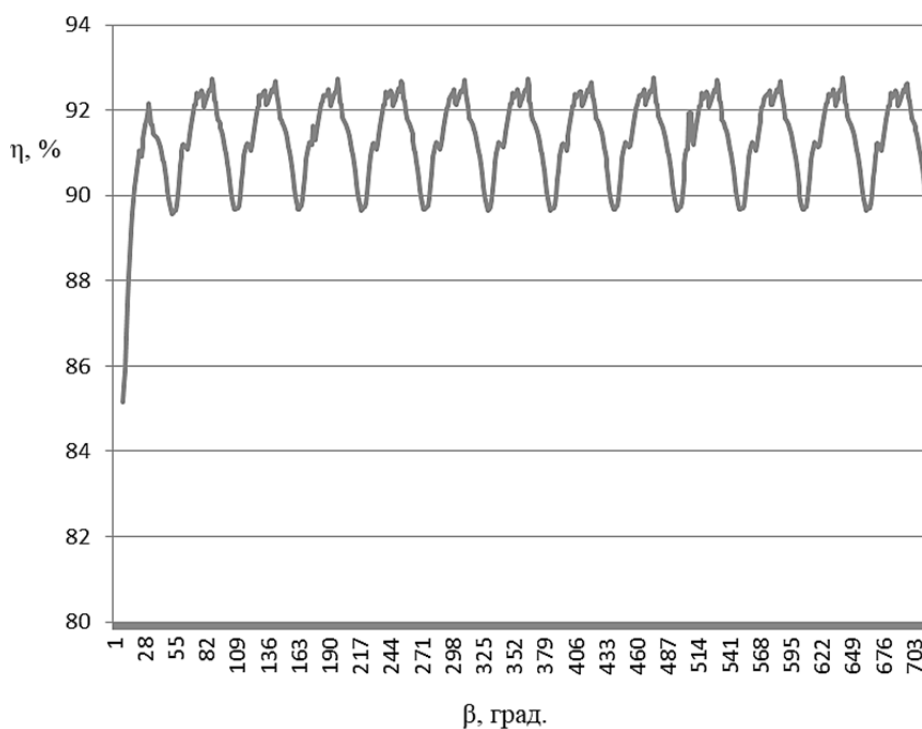


Рисунок 10. — Зависимость КПД от угла поворота выходного звена 5 при наличии связи между узлом вращения с дополнительным эксцентриком 9 и отверстием сателлита 3

Анализ вышеприведенных графических зависимостей позволяет заключить, что кинематическая точность вращения зубчатого колеса 5 находится в диапазоне от 11,7 до 12,1 угловых минут. Колебания КПД эксцентриковой передачи находятся на уровне от 88,9 до 93,0 %. Это говорит о том, что эксцентриковые передачи с параллельным расположением входного и выходного валов имеют уровень технических показателей, аналогичный эксцентриковым передачам с соосным расположением входного и выходного валов [8].

Заключение. Обеспечение поступательного движения сателлита при работе эксцентриковой передачи с параллельным расположением входного и выходного валов возможно только при наличии нового дополнительного кривошипа.

Эксцентриковые передачи с параллельным расположением входного и выходного валов имеют уровень технических показателей, аналогичный эксцентриковым передачам с соосным расположением входного и выходного валов.

С учетом многообразия приводных устройств немаловажным является расширение ассортимента общемашиностроительных редукторных механизмов, способных удовлетворять широкому выбору компоновочных и эксплуатационных показателей за счет использования изделий, имеющих конструкцию предлагаемого типа.

Список цитированных источников

1. Олофинская, В. П. Детали машин. Основы теории, расчета и конструирования : учеб. пособие / В. П. Олофинская. — М. : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2017. — 72 с.
2. Иванов, М. Н. Детали машин : учеб. для академ. бакалавриата / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. — 16-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2018. — 409 с.
3. Планетарная эксцентриковая передача : заявка 20190289 Респ. Беларусь : МПК F16H1/32 / П. Н. Громыко, С. Д. Макаревич, А. С. Макаревич ; дата публ.: 18.11.2019.
4. Макаревич, А. С. Передачи эксцентрикового типа с параллельным расположением входного и выходного валов / А. С. Макаревич, П. Н. Громыко // материалы 55-й студ. науч.-техн. конф., 3—4 мая 2019 г. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2019. — С. 150.
5. Планетарная передача : а. с. 1778392 СССР : МКИЗ F16H1/32 / Г. П. Большаков ; № 4767192/28 ; дата публ.: 30.11.1992.
6. Громыко, П. Н. Силовой анализ контактирующих зубьев эксцентриковой передачи, формообразованных на основе использования удлиненной эпициклоиды / П. Н. Громыко, Д. Ю. Макацария, Р. А. Бондарев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2021. — № 3. — С. 5—13.
7. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач : монография / П. Н. Громыко [и др.] ; под общ. ред. П. Н. Громыко. — Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. — 271 с.
8. Громыко, П. Н. Совершенствование механизма передачи движения на выходное звено в эксцентриковых передачах типа К-Н-V / П. Н. Громыко, С. Н. Хатетовский, Д. Ю. Макацария // Гор. механика и машиностроение. — 2021. — № 2. — С. 27—33.

Поступила в редакцию 28.02.2022.

УДК 621.9

А. Н. Жигалов^{1,2}, доктор технических наук, доцент,
И. А. Горавский²

¹Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов
Национальной академии наук Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев,
Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

²Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5, УПРОЧНЕННОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

Обработка методом аэродинамического звукового упрочнения, основанного на высокоэнергетическом низкотемпературном воздействии энергии, созданной резонансным воздействием акустических волн в звуковом спектре частот, быстрорежущей стали Р6М5 обеспечивает устранение погрешности структуры в виде строчечности сориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз из-за снижения структурной анизотропии, фазового наклепа, происходящих за счет релаксации структурных напряжений, плотности дислокаций, уменьшает размеры первичных карбидов с 7...15 до 3...8 мкм и сокращает их количество в 1,6 раза, что значительно улучшает однородность структуры стали Р6М5.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового упрочнения; быстрорежущие стали; стойкость; микроструктура; металлорежущий инструмент.

Рис. 3. Табл. 2. Библиогр.: 14 назв.

A. N. Jigalov^{1,2}, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,
I. A. Goravskii²

¹State Scientific Institution "Institute of Technology of Metal of National Academy of Sciences of Belarus",
11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

²Educational Institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE HIGH-SPEED STEEL P6M5 MICROSTRUCTURE HARDENED BY THE AERODYNAMIC SOUND METHOD

Processing by the aerodynamic sound hardening method, based on high-energy low-temperature of energy impact created by the resonant effect of acoustic waves in the sound frequency spectrum, high-speed steel R6M5 eliminates the structure error in the form of stitching in the form of carbide phases oriented along the deformation axis due to the decrease in structural anisotropy, phase hardening occurring to the relaxation of structural stresses, dislocation density, reduces the size of primary carbides from 7...15 to 3...8 μm and reduces their number by 1.6 times, which significantly improves the uniformity of the P6M5 (W $\approx$ 6%; Mo $\approx$ 5%) steel structure.

Key words: aerodynamic sound hardening method; high-speed steels; durability; microstructure; metal-cutting tool.

Fig. 3. Table 2. Ref.: 14 titles.

Введение. Одним из самых больших недостатков металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей является недостаточная стойкость, особенно это относится к инструменту, работающему в условиях прерывистого резания, что значительно снижает эффективность металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей [1]. Эксплуатационные характеристики металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали сильно зависят от физико-механических свойств, состава материала, а также от состояния структуры материала инструмента. Химический состав стали Р6М5 приведен в таблице 1.

Т а б л и ц а 1. — Химический состав сталей Р6М5 по ГОСТ 19265-73

Массовая доля элемента, %												
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	V	Co	Cu	Fe
0,82...0,90	0,2...0,5	0,2...0,5	До 0,6	До 0,025	До 0,03	3,8...4,4	4,8...5,3	5,5...6,5	1,7...2,1	До 0,5	До 0,25	До 81,57

Быстрорежущие стали являются одним из основных инструментальных материалов. Это практически вся номенклатура фасонного (сложной формы) режущего инструмента — червячные, концевые и шпоночные фрезы, сверла, долбяки, шеверы и др.

Быстрорежущие стали принципиально отличаются от углеродистых и легированных инструментальных сталей высокой теплостойкостью. Быстрорежущие стали сохраняют высокую твердость при нагреве до температур свыше 620 °С. Высокая теплостойкость быстрорежущих сталей достигается за счет сохранения при высокой температуре мартенсита и коагулированных карбидов, т. е. соблюдается высокий уровень легирования твердого раствора, в котором затруднена диффузия углерода. Кроме того, в структуре должна быть карбидная фаза, обладающая высокой устойчивостью против коагуляции при нагреве (т. е. не цементит). Структура стали имеет сильные легирующие карбидообразующие компоненты, образующие собственные карбиды.

При этом высокая легированность твердого раствора обеспечивается термической обработкой, при которой происходит растворение специальных карбидов в твердом растворе. Основные легирующие компоненты быстрорежущих сталей — это вольфрам и (или) молибден, являющиеся химическими аналогами; в состав сталей также обязательно входят хром для повышения прокаливаемости и ванадий для сохранения мелкого зерна аустенита при закалке. В зависимости от наличия W и Mo стали подразделяются на вольфрамовые, вольфрамомолибденовые и молибденовые.

Быстрорежущие стали маркируются русской буквой «Р», после которой стоящая цифра указывает на содержание вольфрама в стали. Содержание хрома во всех быстрорежущих сталях составляет около 4 % и в марке не указывается. Не указываются также ванадий при его содержании до 2 % и углерод при содержании 0,7...0,9 %. Обозначения этих элементов входят в марку быстрорежущих сталей только при их большем содержании.

Быстрорежущие стали в отожженном состоянии содержат феррит, в котором растворена часть хрома, имеющегося в стали, и карбиды легирующих компонентов. Структура является мелкозернистой — сорбитообразный перлит. Основным элементом является карбид на основе вольфрама и молибдена — $M_6C + MC$ (1 200 HV), который присутствует в количестве около 18 % в структуре стали Р6М5. Также имеются карбиды хрома — $M_{23}C_6$ (твердость — 1 000 HV, количество — около 9 %) и ванадия — MC (2 500 HV, количество — 1,5...2,0 %). Карбиды имеют сложный состав. Помимо атомов основного карбидообразующего компонента (основа карбида) в них присутствуют в определенных количествах атомы железа и других легирующих компонентов. $M_{23}C_6$ состоит из С (5 %), W (10 %), V (3 %), Cr (47 %), Fe (35 %); MC — из С (12 %), W (42 %), V (43 %), Cr (2 %), Fe (1 %); M_6C — из С (2 %), W (65 %), V (3 %), Cr (3 %), Fe (27 %).

По своей природе карбиды подразделяются на эвтектические и вторичные, при этом положение точек S и E на диаграмме Fe—Fe₃C при наличии легирующих компонентов смещается в сторону меньших значений углерода, в связи с чем даже при содержании углерода порядка 0,7 % (минимальное содержание для быстрорежущих сталей) структура литой быстрорежущей стали вследствие высокого содержания легирующих компонентов содержит эвтектику — ледебурит, а быстрорежущая сталь является ледебуритного класса.

Вторичные карбиды выделяются из твердой фазы — аустенита вследствие уменьшения растворимости в нем углерода при понижении температуры (аналогично выделению цемен-

тата из аустенита по линии SE на диаграмме Fe—Fe₃C), а также в результате перлитного превращения. Наличие в структуре эвтектики снижает механические свойства, в связи с чем заготовки из быстрорежущих сталей подвергают горячей ковке и прокату в целях улучшения структуры за счет раздробления эвтектики, после чего подвергают отжигу для улучшения структуры и обеспечения хорошей обрабатываемости резанием. Недостатком является возможность образования крупнозернистой структуры. Далее проводится разупрочняющий отжиг при температуре нагрева 840...860 °C для вольфрамовых и 800...830 °C для вольфрамомолибденовых сталей, т. е. выше температуры $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, с длительной выдержкой, не менее 3 ч, и с последующим медленным охлаждением со скоростью не более 25...30 °C / ч, что обеспечивает структуру зернистого перлита с минимальной твердостью (не более 255 НВ) для удовлетворительной обрабатываемости резанием. В отожженном состоянии выполняются формообразующие операции, после которых осуществляется упрочняющая термическая обработка.

После формирования профиля изделия быстрорежущая сталь подвергается упрочняющей термической обработке, включающей закалку и отпуск, которые проводятся в целях получения высоких значений твердости и теплостойкости, при этом в структуре осуществляется мартенситное превращение с последующим дисперсионным твердением: обеспечивается высокая легированность мартенсита (при закалке) и интенсивное дисперсионное твердение (при отпуске).

Для обеспечения высокой легированности твердого раствора температура закалки быстрорежущих сталей должна превышать 1 200 °C, т. е. температура должна быть выше температур растворения карбидов быстрорежущих сталей: карбиды на основе хрома M₂₃C₆ полностью растворяются в аустените при 1 100 °C, карбиды на основе M₆C — свыше 1 200 °C, MC на основе ванадия — даже при более высоких температурах, в связи с чем температура закалки молибденовых сталей P6M5 — 1 210...1 230 °C.

Однако после закалки в структуре остается часть нерастворившихся избыточных карбидов эвтектического происхождения и часть вторичных карбидов, имеющих довольно крупные зерна, что снижает прочность и вязкость.

Высокая концентрация углерода и легирующих компонентов в аустените, приводящая к снижению температур начала (M_n) и конца (M_k) мартенситного превращения, сохраняет в структуре закаленных быстрорежущих сталей достаточно большое количество (до 30 %) остаточного аустенита.

Таким образом, структура закаленных быстрорежущих сталей — мартенсит закалки, карбиды и остаточный аустенит. Изменения структуры быстрорежущей стали позволяют изменять ее свойства.

Разработанный метод аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ) [2; 3], основанный на высокоэнергетическом низкотемпературном воздействии энергии, созданной резонансным воздействием акустических волн в звуковом спектре частот, позволяет за счет структурных изменений обеспечивать повышение ударной вязкости при сохранении исходной твердости, обеспечивая за счет этого повышение ресурса металлорежущего инструмента, работающего при процессах прерывистого резания, до 4,2 раз [4; 5].

В связи с тем, что структурно-фазовое состояние быстрорежущей стали, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, никогда не исследовались, весьма актуальным является проведение таких исследований.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на специально подготовленных образцах.

Образцы в виде шлифов подготавливались для определения микротвердости с помощью светового и электронного микроскопов, а также количественного измерения структурных составляющих. Образцы вырезались из фрез P6M5 абразивным кругом на основе Al₂O₃. Соблюдение параллельности между базовой и исследуемой поверхностями обеспечивалось за счет шлифования на плоскошлифовальном станке. Использовалась охлаждающая жидкость.

Далее образцы помещались внутрь литейной формы и заливались твердеющим веществом. Образцы, залитые в форму, шлифовались на полировальной машине Chennai Metco PMV023 с помощью набора шлифовальных водупорных шкурок на бумаге, изготовленных из зеленого корунда, начиная с среднезернистой и заканчивая мелкозернистой.

После этого проводили полировку шлифов для устранения имеющихся после разрезки неровностей поверхности без деформирования металла. Полировка шлифа осуществлялась механическим способом, при котором образцы осторожно обрабатывали тонким абразивом, действие которого принципиально не отличалось от действия абразивов при шлифовке. Для полировки использовали окись алюминия, окись хрома, окись железа. Механическую полировку производили на специальном полировальном станке, диск которого обтягивался фетром. Полировальный диск смачивался полировальной жидкостью, состоящей из воды, в которой во взвешенном состоянии находятся очень мелкодисперсные частицы полировального порошка: окись хрома, окись алюминия, окись железа. Полировка продолжалась 5...10 мин и заканчивалась после того, как микрошлиф приобретал зеркальную поверхность. Критерием готовности шлифа являлось отсутствие на нем дефектов в виде рисок.

На рисунке 1 изображены представители шлифов, используемых для исследований.

Микроструктура и размер зерна определялись по ГОСТам 9391-80 и 4872-75. Микроструктуру стали изучали на нетравленных и протравленных образцах. Травление осуществляли 4 %-ным раствором пикриновой кислоты в воде.

Исследование структуры образцов и элементного состава по структурным составляющим проводили на аттестованном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) высокого разрешения Mira фирмы Tescan (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания). Погрешность метода в данном случае составляла 8...10 относительных процентов. Исследуемая поверхность с помощью СЭМ облучалась тонкосфокусированным электронным пучком, находящимся либо в покое, либо в развернутом в растр по поверхности образца состоянии. В результате взаимодействия возникают вторичные электроны, отраженные электроны, характеристическое рентгеновское излучение, оже-электроны и фотоны различных энергий. Они рождаются в определенных объемах (областях генерации внутри образца) и используются для измерения многих его характеристик (состава, топографии поверхности, кристаллографической ориентации и т. д.). Следовательно, при съемке образцов в режиме вторичных электронов (SE) контраст на изображении создается за счет отражения электронного пучка от поверхности образца, т. е. создается само изображение.

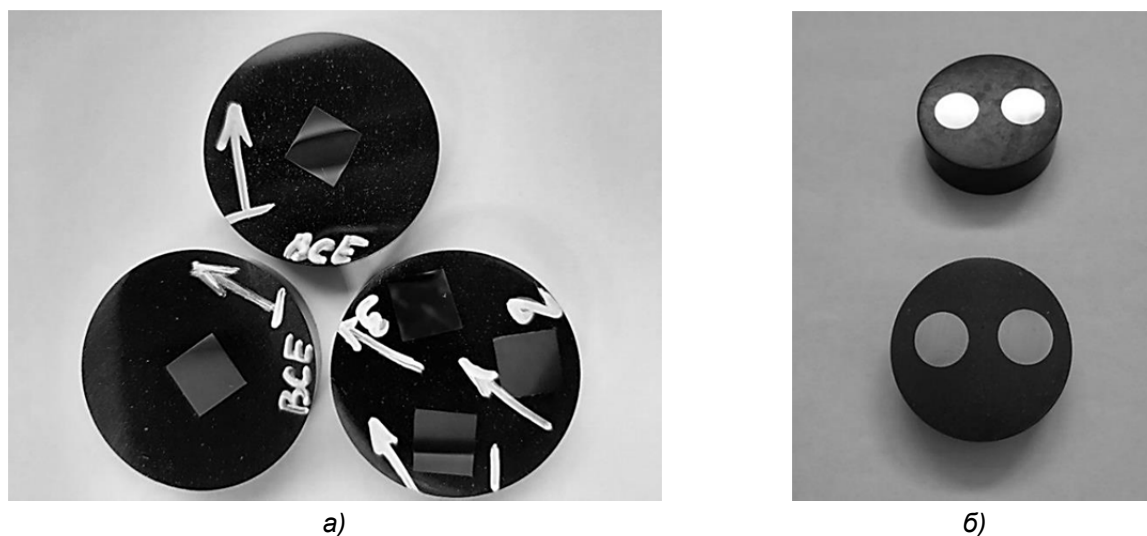


Рисунок 1. — Шлифы образцов, используемых для исследований:
а — из квадратных образцов; б — из круглых образцов

Сканирующий электронный микроскоп, имеющий высокое разрешение, достигающее 5...10 нм, является одним из наиболее универсальных приборов для исследования и анализа микроструктурных характеристик твердых тел. Одна из важных особенностей СЭМ состоит в том, что он позволяет наблюдать топографию твердого тела с разрешением и глубиной резкости, значительно превосходящими соответствующие показатели световых микроскопов. Информация при исследовании поверхности переносится отраженными вторичными электронами и другими имитирующими сигналами. Толщина образца не имеет особого значения. Тип используемого детектора, увеличение и другие параметры съемки указаны в информационной строке внизу каждого кадра.

Результаты исследования и их обсуждение. Известно, что на прочностные свойства быстрорежущих сталей заметное влияние оказывает содержание углерода в мартенсите, объемная доля вторичных карбидов, их дисперсность и распределение, а также количество остаточного аустенита. На показатели вязкости влияют величина зерна, форма и дисперсность карбидов [6].

Упрочнение аэродинамическим звуковым методом осуществлялось в установке, изготовленной по конструкторской документации КД ИЖАН.443249.001 (ширина $\times$ длина $\times$ высота — 180 $\times$ 480 $\times$ 550 мм) [4], по методике [7] последовательно на режиме 1 (давление подаваемого в камеру воздуха — 0,16 МПа, резонансная частота — 159 Гц), а затем на режиме 2 (давление подаваемого в камеру воздуха — 0,16 МПа, резонансная частота — 148 Гц). Перед каждым режимом упрочнения образцы нагревались до температуры 280 °С. Время упрочнения на режимах: первом — 5 мин, втором — 4 мин.

На рисунке 2 представлены микроструктуры сталей Р6М5 без упрочнения (*а*) и упрочненных аэродинамическим звуковым методом (*б*).

На приведенных снимках образцов из стали Р5М5 без упрочнения (см. рисунок 2, *а*) видно явное присутствие продольных деформационных линий, которые образовались при горячей прокатке круглого профиля.

Основной способ получения прутковых полуфабрикатов из быстрорежущих сталей путем горячей прокатки является наиболее дешевым в отличие от способа порошкового спекания. Однако при способе горячей прокатки быстрорежущих сталей из-за особенностей строения данного вида сталей в структуре происходят изменения вдоль направления прокатки, что серьезным образом сказывается на снижении прочностных свойств получаемых прутковых быстрорежущих сталей. Известно, что сориентированные вдоль оси деформации карбидные фазы приводят к анизотропии объемных изменений и возрастанию уровня термических напряжений, вызванных явлением фазового наклепа [8].

Наличие строчечности вдоль оси проката и неравномерное распределение карбидов по сечению проката является одним из существенных недостатков инструментальной стали Р6М5 в состоянии поставки в виде горячекатаных прутков, которые широко используются для изготовления металлорежущего, штампового и холодновысадочного инструмента. Имеющаяся структурная неоднородность снижает прочностные характеристики металлорежущего инструмента, особенно работающего со значительными ударными нагрузками. Например, на таких технологических операциях, как вырубка, пробивка, редуцирование, выдавливание, наличие строчечности приводит к адгезионному схватыванию и повышению чувствительности к усталостному выкрашиванию инструмента из быстрорежущих сталей Р6М5 [9—11].

Опасность наличия строчечности связана с тем, что если в инструменте линии строчечности будут направлены поперек режущего зуба, то в местах их скопления металл ослабнет и при наличии значительных поперечных, связанных с ударом нагрузок, произойдет выкрашивание зуба или его облом.

Анализ структурного состояния образцов стали Р6М5 с АДУ (см. рисунок 2, *б*) показывает, что строчечность в продольном направлении значительно уменьшается по сравнению с образцами в исходном состоянии (см. рисунок 2, *а*).

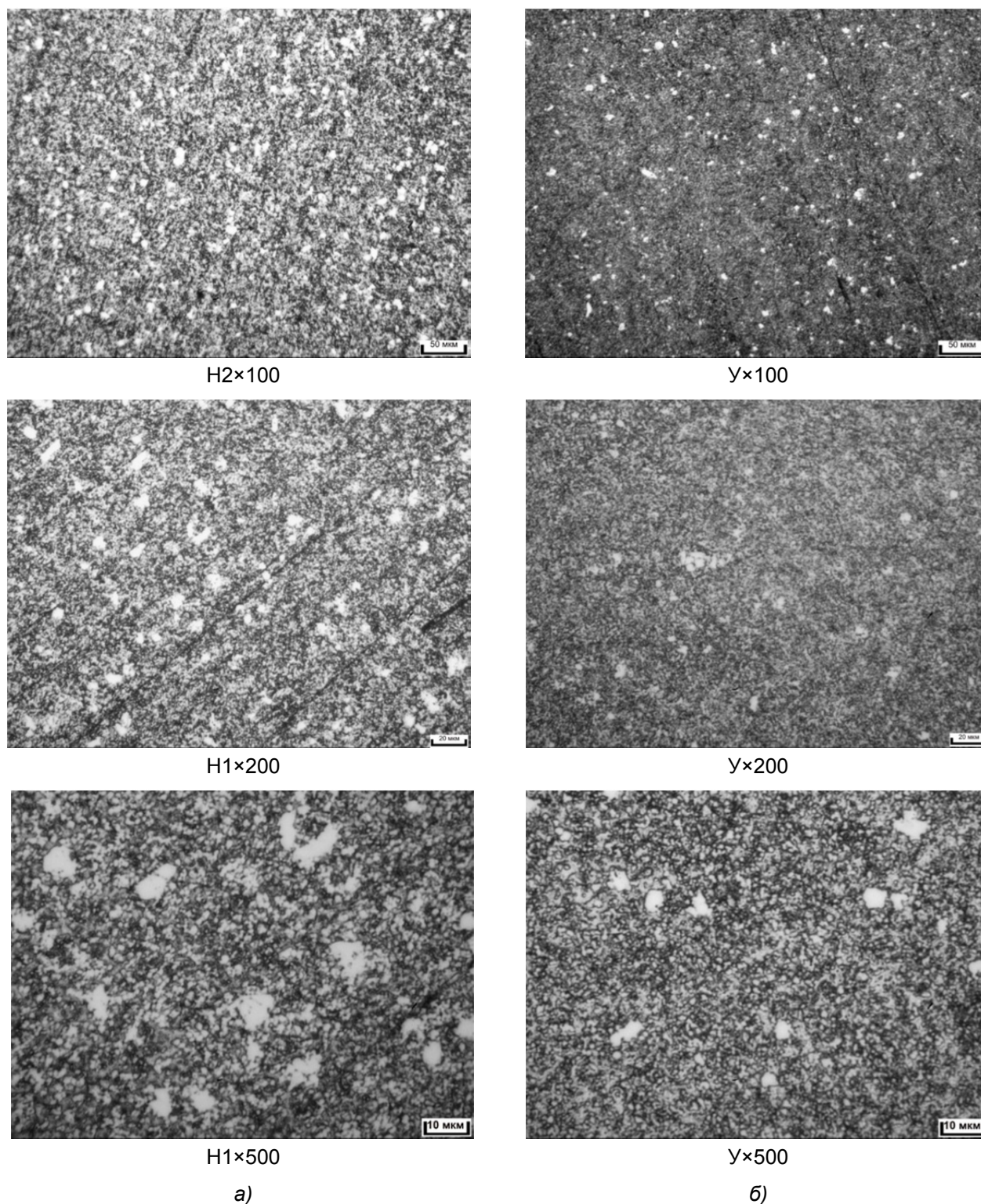


Рисунок 2. — Микроструктура стали Р6М5 без упрочнения (а) и после АДУ (б)

Так, обработка стали Р6М5 методом АДУ устраняет погрешности структуры в виде строчечности сориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз из-за снижения структурной анизотропии, фазового наклепа, происходящих за счет релаксации структурных напряжений, плотности дислокаций.

Из рисунка 2 видно, что микроструктура закаленной и отпущенной стали Р6М5 как без упрочнения, так и упрочненной АДУ, состоит из мелкоигльчатого мартенсита и большого

количества остаточного аустенита (темные места), а также из крупных первичных (крупные светлые включения) и более мелких вторичных карбидов (мелкие светлые включения).

Следует отметить, что при травлении основная структурная составляющая — мартенсит — из-за своей мелкоигольчатой структуры плохо выделяется. На первый взгляд создается картина присутствия только аустенита и карбидов. В действительности (см. рисунок 2) темные включения состоят из 60...70 % мартенсита и 25...30 % остаточного аустенита, а белые включения представляют собой 5,8...8,9 % карбидов.

Мартенсит, полученный при закалке стали из высоколегированного аустенита, является также высоколегированным и отвечает за высокую красностойкость и твердость. Сталь Р6М5 обладает красностойкостью, равной 620 °С, под которой понимается температура отпуска продолжительностью 4 ч, снижающая твердость стали до 58 HRC.

Количественные изменения в структуре мартенсита и остаточного аустенита у образцов стали Р6М5 без и с АДУ (см. рисунок 2) не зафиксированы при укрупненной визуализации (увеличение $\times 500$) структур с помощью человеческого глаза, без соответствующих приборов.

Известно, что высокие режущие свойства стали Р6М5 обеспечиваются благодаря наличию вторичных карбидов и легированием твердого раствора элементами, входящими в состав этих карбидов. Как видно из структур сталей Р6М5 без и с АДУ, при увеличении $\times 500$ (см. рисунок 2) количество и размеры вторичных карбидов не изменились после АДУ по сравнению с неупрочненными сталями.

В то же время размеры и количество первичных карбидов в неупрочненной стали Р6М5 (см. рисунок 2, а, $\times 500$) и в стали, упрочненной АДУ (см. рисунок 2, б, $\times 500$), значительно отличаются.

Роль первичных карбидов связана с тем, что они препятствуют росту аустенитного зерна. Без первичных карбидов при высоких температурах закалки (1 200 °С и выше) получилось бы крупное зерно аустенита и повышенная хрупкость, тогда как известно, что у большинства быстрорежущих сталей зерно мелкое [12]. Карбидная неоднородность способствует созданию значительной анизотропии свойств в сталях.

Форму, расположение и распределение эвтектических карбидов характеризуют баллом карбидной неоднородности. По ГОСТ 19265-73 для вольфрамомолибденовых сплавов балл карбидной неоднородности определялся сравнением с эталонами шкалы № 2. Как видно из рисунка 2, а, $\times 100$, сталь Р6М5 без упрочнения имеет балл 1. Сталь Р6М5 после АДУ (см. рисунок 2, б, $\times 100$) не имеет оценки карбидной неоднородности по ГОСТ 19265-73, т. е. карбидная структура значительно однороднее, чем сталь с неупрочненной структурой.

Следовательно, обработка быстрорежущей стали Р6М5 аэродинамическим звуковым методом позволяет обеспечивать снижение балла карбидной неоднородности на 1 балл.

В таблице 1 приведено количество первичных карбидов и их размеры для стали Р6М5 без и после АДУ.

Анализ замеров количества первичных карбидов и их размеров для стали Р6М5 без и с АДУ (см. рисунок 2, $\times 500$, таблица 2) показывает, что у образцов стали Р6М5 без упрочнения размеры первичных карбидов равны 7...15 мкм и количество составляет 21 шт. на площади 0,008 мм², а у образцов стали Р6М5, упрочненной аэродинамическим звуковым методом, — 3...8 мкм и 13 шт., т. е. сокращается их количество в 1,6 раза.

Это позволяет сделать вывод о том, что применение метода АДУ значительно улучшает однородность структуры стали Р6М5.

Т а б л и ц а 2. — Количество первичных карбидов и их размеры для стали Р6М5 без и с АДУ

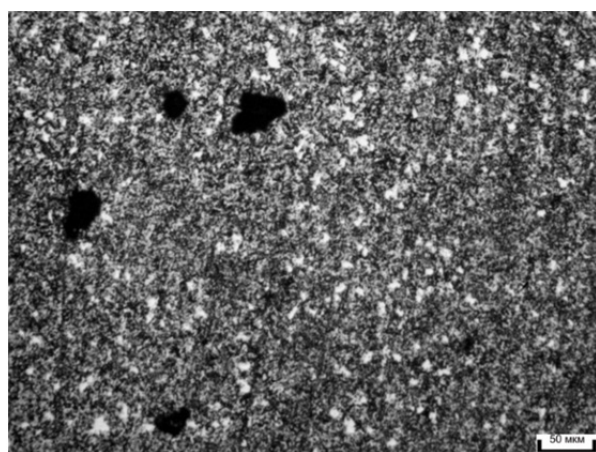
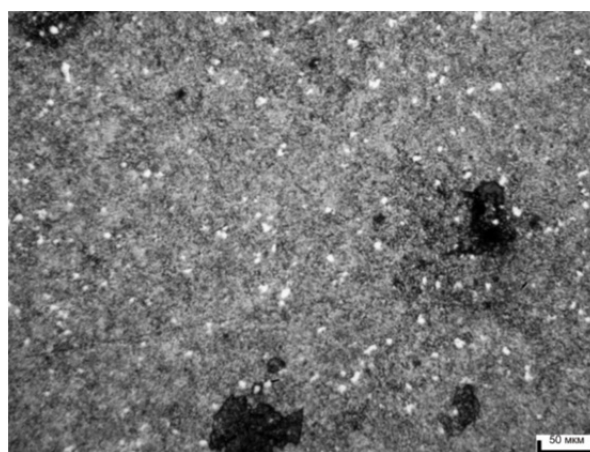
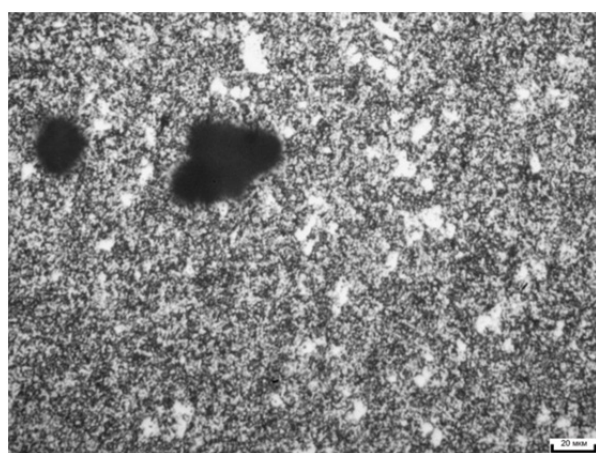
Состояние стали	Количество первичных карбидов на площади 0,008 мм ² и их размеры, мкм																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Без АДУ	7	12	7	7	8	9	12	8	14	13	10	11	14	15	10	7	10	8	7	9	12
С АДУ	6	6	8	8	8	6	5	5	5	5	4	3	5	—	—	—	—	—	—	—	—

При увеличении $\times 200$ видно, что на образцах стали Р6М5 без упрочнения (рисунок 3, а) присутствуют крупные частицы карбидов размером $8 \dots 12$ мкм, которые представляют собой конгломераты сросшихся небольших частиц и имеющих вытянутую форму.

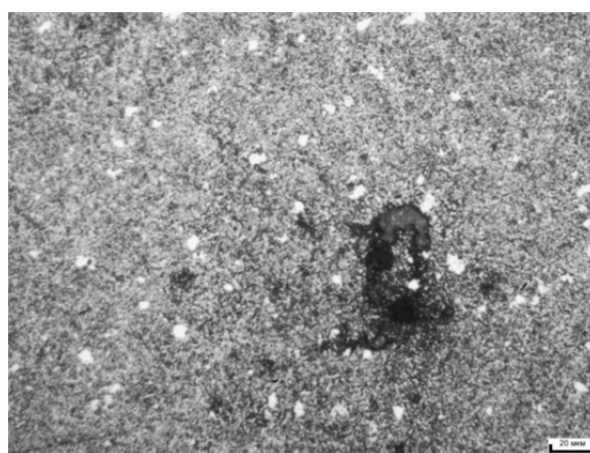
Известно, что качество быстрорежущей стали определяется степенью прокованности. Недостаточная проковка проявляется посредством наличия карбидной ликвации, характеризующейся наличием остатков участков ледебуритной эвтектики (первичных карбидов), не разбитых ковкой или прокаткой [12]. Наличие карбидной ликвации резко понижает механические свойства стали. Карбидная ликвация резко усиливает микроскопическую неоднородность металла, в случае выхода такой неоднородности на рабочую поверхность инструмента значительно ускоряется начало разрушения рабочей поверхности инструмента. Как правило, для быстрорежущей стали Р6М5, идущей на производство инструмента, карбидная ликвация ограничивается двумя баллами.

Как видно из рисунка 3, б, на образцах стали Р6М5, упрочненных аэродинамическим звуковым методом, также присутствуют крупные частицы карбидов размером $8 \dots 12$ мкм, представляющие собой конгломераты сросшихся небольших частиц и имеющих вытянутую форму.

Известно, что карбидная неоднородность существенно влияет на прочностные свойства деформируемой стали после закалки и отпуска. По мере увеличения карбидной неоднородности прочностные свойства ухудшаются, что приводит к снижению стойкости инструмента в результате выкрашивания режущей кромки или его поломки.

Н $\times 100$ У2 $\times 100$ Н $\times 200$

а)

У2 $\times 200$

б)

Рисунок 3. — Карбидная ликвация в быстрорежущих сталях Р6М5 без упрочнения (а) и с АДУ (б)

Крупные карбиды менее эффективно задерживают рост зерна, слабее связаны с матрицей и быстрее выкрашиваются из рабочей кромки инструмента при его эксплуатации. Известно, что при увеличении размеров карбидов с 8...10 до 15...20 мкм наблюдается снижение стойкости инструмента в 2 раза в тех случаях, когда радиус закругления режущей кромки соизмерим с размерами крупных карбидов и когда инструмент работает с малыми толщинами среза [13]. Структурная однородность стали Р5М5 повышает такие свойства, как теплостойкость и износостойкость. Использование инструмента из стали Р5М5, работающего при процессах прерывистого резания, имеющего однородную структуру, способно повысить их прочностные и стойкостные характеристики [8].

Обработка стали Р6М5 методом АДУ не ликвидирует структурные погрешности в виде карбидной ликвации, полученной при прокатке стали.

В работе [14] указывается, что улучшение структуры быстрорежущей стали за счет уменьшения карбидной неоднородности приводит к повышению ударной вязкости быстрорежущей стали Р6М5.

В связи с тем, что в данных исследованиях получены аналогичные результаты, связанные с достижением структурной карбидной однородности для стали Р6М5, но только не на стадии первичной кристаллизации в сталях, а на стадии улучшения готового продукта, что является весьма дешевым и производительным методом структурного улучшения инструмента, весьма актуальным является проведение в дальнейшем исследований по влиянию метода АДУ на повышение ударной вязкости стали Р6М5.

Заключение. Установлено, что метод АДУ [2; 3], основанный на высокоэнергетическом низкотемпературном воздействии энергии, созданной резонансным воздействием акустических волн в звуковом спектре частот, при воздействии на быстрорежущую сталь Р6М5 позволяет:

- 1) обеспечивать устранение погрешности структуры в виде строчечности и сориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз из-за снижения структурной анизотропии, фазового наклепа, происходящих за счет релаксации структурных напряжений, плотности дислокаций;
- 2) обеспечивать снижение балла карбидной неоднородности на 1 балл;
- 3) значительно уменьшать размеры первичных карбидов с 7...15 до 3...8 мкм и сокращать их количество в 1,6 раза, т. е. применение метода АДУ значительно улучшает однородность структуры стали Р6М5.

Также установлено, что обработка быстрорежущей стали Р6М5 методом АДУ не ликвидирует структурные погрешности в виде карбидной ликвации, полученной при прокатке стали.

Полученные результаты исследований, связанные с достижением структурной карбидной однородности для быстрорежущей стали Р6М5 за счет воздействия методом АДУ на стадии улучшения готового продукта, что является достаточно дешевым и производительным методом структурного улучшения инструмента, показывают, что весьма перспективно проведение в дальнейшем исследований по влиянию методом АДУ на повышение ударной вязкости стали Р6М5, результатом которого может быть повышение ресурса инструмента быстрорежущей стали Р6М5 при прерывистых процессах резания.

Список цитированных источников

1. Жигалов, А. Н. Оптимизация износа и ресурса металлорежущего твердосплавного инструмента сплава В35, упрочненного аэродинамическим звуковым методом / А. Н. Жигалов, И. А. Горавский, Д. Д. Богдан // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2020. — Вып. № 8. — С. 21—32.
2. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 2557175 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков ; дата опубл.: 20.07.2015.
3. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 21049 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. ; дата опубл.: 30.06.2017.
4. Жигалов, А. Н. Теоретические и технологические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.07 / А. Н. Жигалов. — Минск, 2021. — 382 л.

5. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
6. Христофорова, Т. А. Структура и свойства стали Р6М5 после электроотпуска / Т. А. Христофорова, Е. А. Кузьменко. — Харьков : Нац. техн. ун-т ХПИ, 2016. — 377 с.
7. Горавский, И. А. Методика проведения аэродинамического звукового упрочнения осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Векторы инновационного развития : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. / Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. — С. 83—84.
8. Формирование структуры и свойств в инструментальной быстрорежущей стали методом холодной интенсивной деформации и последующей термической обработкой / Э. Ф. Хайретдинов [и др.] // Материалы физики и механики. — 2016. — № 27. — С. 205—214.
9. Околович, Г. А. Штамповые стали для холодного деформирования металлов : монография / Г. А. Околович. — Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2010. — 202 с.
10. Жернаков, В. С. Проектирование составного холодновысадочного инструмента / В. С. Жернаков, А. А. Кузьминых, Р. Якупов. — М. : Машиностроение, 1999. — 221 с.
11. Скрынченко, Ю. М. Работоспособность и свойства инструментальных сталей / Ю. М. Скрынченко, Л. А. Позняк. — Киев : Наук. думка, 1979. — 167 с.
12. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.
13. Материаловедение : учеб. для высш. техн. учеб. заведений / Б. Н. Арзамасов [и др.]. — М. : Машиностроение, 1986. — 384 с.
14. Перспективы использования быстрорежущих сталей для изготовления литого металлорежущего инструмента. Пути улучшения структуры и свойств / А. С. Чаус [и др.] // Литье и металлургия. — 2004. — № 2 (30). — С. 98—104.

Поступила в редакцию 28.02.2022.

УДК 538.911; 549.086; 621.373

В. В. Малеронок¹, А. В. Кушнеров²,**А. В. Алифанов³**, доктор технических наук, профессор¹Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 561 28 88, s-tm.v.v@mail.ru²Государственное научное учреждение «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси», ул. Академическая, 12, 220072 Минск, Республика Беларусь, v_kukareko@mail.ru³Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь, alifanov_aav@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ РЕЖУЩЕГО ОСЕВОГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ

Исследовалось влияние магнитно-импульсной обработки осевого режущего инструмента из инструментальных сталей Р6М5 и Х6ВМФ на их структуру, фазовый состав и микротвердость. Обнаружено аномально высокое содержание остаточного аустенита в режущей кромке сверла из стали Х6ВМФ. Показано, что в результате магнитно-импульсной обработки сверла из стали Х6ВМФ количество остаточного аустенита в режущей кромке уменьшилось от $V_\gamma = 78\%$ до $V_\gamma = 62\%$, а микротвердость поверхности увеличилась от 550 до 830 HV 0,025. Установлено, что магнитно-импульсная обработка сверл из стали Р6М5 приводит к незначительному уменьшению количества остаточного аустенита в режущей кромке сверла и увеличению микротвердости кромки от 660 до 750 HV 0,01. Установлено, что наложение магнитного поля в процессе магнитно-импульсной обработки сталей приводит к смещению температуры начала мартенситного превращения, что сопровождается снижением количества аустенитной фазы в сталях и увеличением их микротвердости. Воздействие давления магнитного поля на поверхность обрабатываемого инструмента приводит к деформации обрабатываемого материала, что также может сопровождаться эффектом деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и упрочнением стали.

Ключевые слова: магнитно-импульсная обработка; сверло; остаточный аустенит; фазовые переходы; микротвердость; режущий инструмент; сталь Р6М5; сталь Х6ВМФ.

Рис. 2. Табл. 2. Библиогр.: 16 назв.

V. V. Maleronok¹, A. V. Kushnerou²,**A. V. Alifanov³**, DSc in Technical Sciences, Professor¹Educational Institution "Belarusian State Aviation Academy", 77 Uborevicha Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 561 28 88, s-tm.v.v@mail.ru²State Scientific Institution "Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus", 12 Akademicheskaya Str., 220072 Minsk, the Republic of Belarus, v_kukareko@mail.ru³Educational Institution "Baranovichi State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus, alifanov_aav@mail.ru

THE EFFECT OF MAGNETIC PULSE PROCESSING ON PHASE TRANSITIONS IN THE SURFACE LAYER OF A CUTTING AXIAL TOOL OF TOOL STEEL

The effect of magnetic pulse processing of axial cutting tools made of tool steels P6M5 ($W \approx 6\%$; $Mo \approx 5\%$) and X6BMF ($Cr \approx 6\%$; $W \approx 1\%$; $Mo \approx 1\%$; $V \approx 1\%$) on their structure, phase composition and microhardness were studied. An abnormally high content of residual austenite in the cutting edge of the drill made of steel X6BMF was found. It is shown that as a result of magnetic pulse processing of a drill made of steel X6BMF, the amount of residual austenite in the cutting edge decreased from $V_\gamma = 78\%$ to $V_\gamma = 62\%$, and the microhardness of the surface increased from 550 to 830 HV 0.025. It is established that MPP of drills made of P6M5 steel leads to a slight decrease for austenite in the cutting edge of the drill and an increase in the microhardness of the edge from 660 to 750 HV 0.01. It is established that the superposition of a magnetic field during the magnetic pulse processing of steels leads to a shift in the temperature in the beginning of the martensitic transformation, which is accompanied by a decrease in the austenitic

phase amount in the steels and an increase in their microhardness. In addition, the effect of magnetic field pressure on the surface of the processed tool leads to deformation of the processed material, which can also be accompanied by the effect of deformation-activated $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation of steel hardening.

Key words: magnetic pulse processing; drill; residual austenite; phase transitions; microhardness; cutting tool; R6M5 steel; X6BMФ steel.

Fig. 2. Table 2. Ref.: 16 titles.

Введение. Среди применяющегося в промышленности Республики Беларусь металло- и деревообрабатывающего инструмента следует выделить осевой режущий инструмент из быстрорежущей стали (сверла, фрезы, метчики, развертки и т. д.), отличающийся повышенной износостойкостью режущих кромок, но при действии ударных нагрузок подверженный выкрашиванию и разрушению. Широкое распространение также получил инструмент из стали повышенной износостойкости, легированной вольфрамом, молибденом и ванадием (например, сталь X6BMФ). На территории Республики Беларусь производство осевого режущего инструмента ограничено предприятием ОАО «Оршанский инструментальный завод», а большинство импортного инструмента поставляется из России, Китая и Германии. При этом качество и технологичность изготовления импортного инструмента зачастую не соответствует ГОСТам (по химическому составу, твердости, проценту остаточного аустенита, шероховатости и баллу зернистости, стойкости и т. д.). В связи с этим актуальной проблемой является повышение эксплуатационных показателей всей номенклатуры режущего инструмента на стадии производства либо финишная обработка готовых изделий перед эксплуатацией. При этом возможно применение методов поверхностного упрочнения готовых изделий, основанных на нанесении соответствующих покрытий или физико-химическом модифицировании поверхностного слоя, направленных на повышение прочности и износостойкости инструмента [1—4]. Кроме того, наряду с известными способами упрочнения режущего инструмента (термическая, термомеханическая, химико-термическая обработка) все более широкое распространение получают инновационные методы поверхностной обработки: напыление защитных покрытий, электроискровое, лазерное, электронно-лучевое и магнитно-импульсное упрочнение [5—9]. Одним из перспективных методов упрочняющей обработки готовых изделий является магнитно-импульсная обработка (далее — МИО), которая обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами: низкая себестоимость обработки, сохранение геометрии обработанных изделий, отсутствие расходных материалов и дополнительных агрессивных сред, простота технологической оснастки и экологическая чистота [8; 9].

Материалы и методы исследования. Для проведения МИО использованы партии закаленных сверл двух диаметров: 10 мм («Томский инструмент»), изготовленные из быстрорежущей стали Р6М5; 20 мм («Туламаш»), изготовленные из стали повышенной износостойкости типа X6BMФ. На исследуемых сверлах определялся их химический состав с использованием оптико-эмиссионного спектрометра Spectro.

Химический состав образцов сверл диаметром 10 и 20 мм представлен в таблице 1, где также приведен химический состав стандартной быстрорежущей стали Р6М5 в соответствии с ГОСТ 19265-73 [10].

Согласно данным таблицы 1, партия сверл диаметром 10 мм по большинству элементов соответствовала показателям ГОСТа стали Р6М5. Сверла диаметром 20 мм соответствовали вольфрам-молибденовой стали повышенной износостойкости типа X6BMФ [11].

Магнитно-импульсная обработка сверл проводилась на установке МИУ-3 (с увеличенной конденсаторной батареей) серией импульсов (по 7 импульсов в серии; энергия импульса составляла 10 кДж). Измерение микротвердости проводилось методом Виккерса на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор 10 и 25 г.

Т а б л и ц а 1. — Химический состав образцов сверла

Химический элемент	Образец		
	Р6М5 (ГОСТ 19265)	Р6М5 (сверло Ø10 мм)	Х6ВМФ (сверло Ø20 мм)
C	0,82...0,90	0,89	1,20
Si	0,20...0,50	0,36	1,69
Mn	0,20...0,50	0,24	0,32
Ni	До 0,60	0,32	0,19
S	До 0,025	0,023	0,01
P	До 0,03	0,03	0,02
Cr	3,80...4,40	3,52	5,14
Mo	4,80...5,30	5,53	1,05
W	5,50...6,50	5,27	1,44
V	1,70...2,10	1,70	0,69
Co	До 0,50	0,32	—
Cu	До 0,25	0,23	0,10
Fe	От 75,00	81,80	88,83

Рентгеноструктурный анализ образцов сверл проводился на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном кобальтовом ($\text{CoK}\alpha$) излучении ($\lambda = 0,178897$ нм). Рентгеновская съемка осуществлялась в фокусировке по Брэггу—Брентано в непрерывном режиме со скоростью 0,01 град / с при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Для расшифровки фазового состава использовалась картотека стандартных спектров PDF-2. При обработке данных рентгеноструктурного анализа использовались программы автоматизированного программного комплекса Crystallographica Search-Match и HighScore Plus Demo. Определение количества остаточного аустенита проводилось с помощью расчетов интегральной площади дифракционных линии 110 от α -Fe и линии 111 от γ -Fe.

Результаты исследования и их обсуждение. Проводилось исследование микротвердости сверл, изготовленных из стали Х6ВМФ (Ø 20 мм) и стали Р6М5 (Ø 10 мм), а также определение фазового состава сверл в состоянии поставки и после различных циклов МИО.

В исходном состоянии режущий инструмент из стали Р6М5 (Ø 10 мм) содержит мартенсит (α -Fe), аустенит (γ -Fe) и карбиды вольфрама (рисунок 1, а). Содержание аустенитной фазы в поверхностном слое режущей кромки $V_\gamma = 26$ %, что согласуется с литературными данными для термообработанной закаленной стали Р6М5 [12]. В центральной части сверла содержание остаточного аустенита не превышало 15 %.

В состоянии поставки сверло из стали Х6ВМФ имело микротвердость сердцевины 730 HV 0,025, а микротвердость режущей кромки составляла 550 HV 0,025. Фазовый состав сверла Ø 20 мм из стали Х6ВМФ включает в себя мартенсит (α -Fe) и аустенит (γ -Fe). При этом содержание аустенитной фазы в сердцевине сверла Ø 20 мм составляло 15 %, а в поверхностном слое режущей кромки сверла $V_\gamma = 78$ % (см. рисунок 1, б). Пониженная твердость и аномально высокое содержание аустенита в режущей кромке сверла Ø 20 мм связано, по-видимому, с нарушением технологии механической шлифовки сверла — образованием прижогов.

После серии циклов МИО сверл (7 импульсов, 10 кДж) количество остаточного аустенита в их режущих кромках существенно снижается (см. рисунок 1, в, г). В частности, для сверла Ø 10 мм содержание аустенитной фазы уменьшается до $V_\gamma = 23$ %, а для сверла Ø 20 мм V_γ уменьшается до 62 %. При этом в стали Р6М5 существенно возрастает микротвердость.

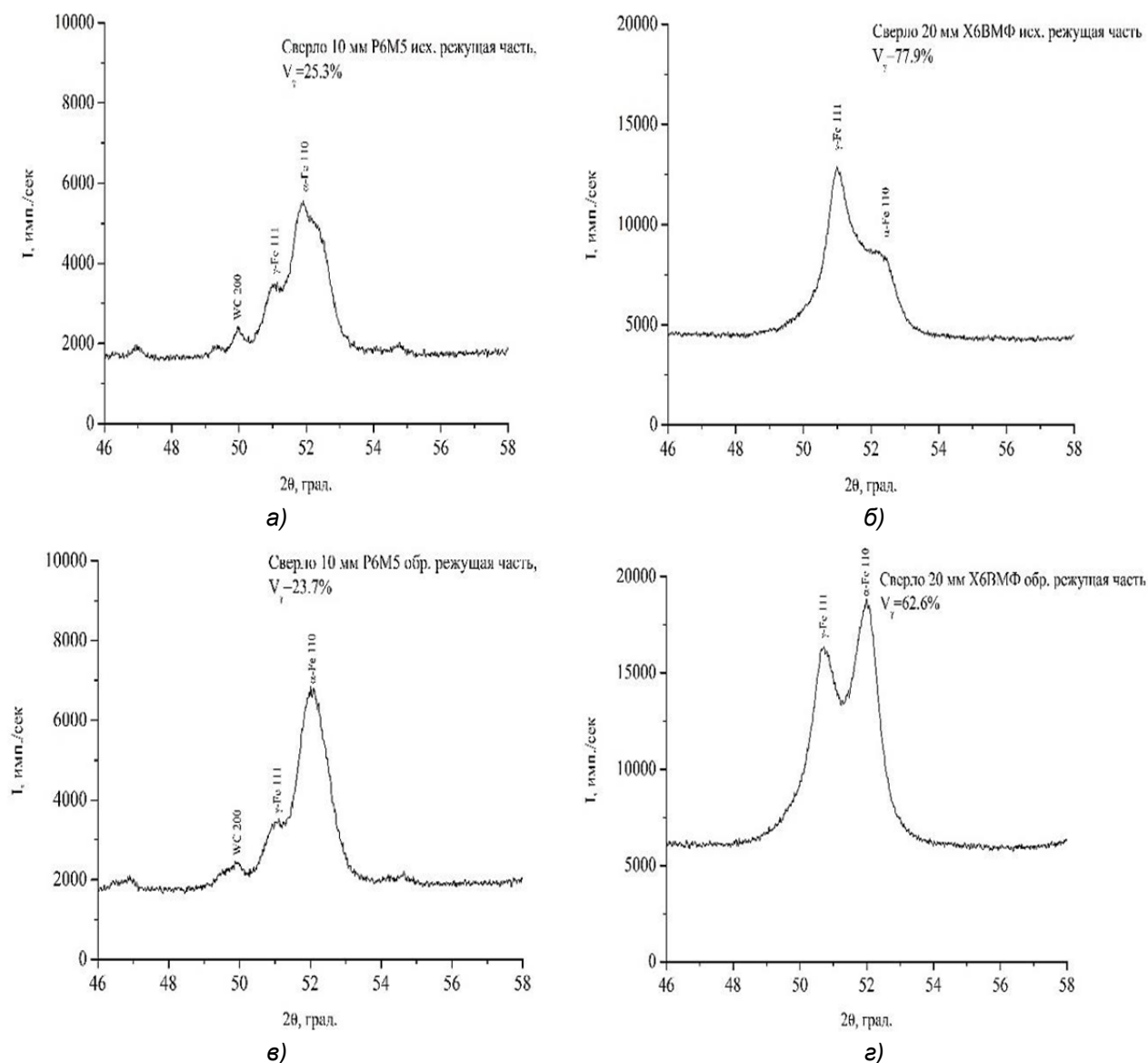


Рисунок 1. — Рентгеновские дифракционные линии от аустенитной фазы в режущей части сверла: а — исходного диаметром 10 мм; б — исходного диаметром 20 мм; в — обработанного (7 импульсов, 10 кДж) диаметром 10 мм; г — обработанного (7 импульсов, 10 кДж) диаметром 20 мм

Измерение микротвердости сверла выполнялось по пяти контрольным точкам (рисунок 2). Результаты измерения представлены в таблице 2. Микротвердость сверла в исходном состоянии изменяется от 630 до 710 HV 0,01, а средняя микротвердость по всему сечению режущего инструмента составляет 660 HV 0,01. После применения МИО микротвердость стали Р6М5 возрастает до уровня 750 HV 0,01. В стали Х6ВМФ микротвердость поверхности возрастает до уровня 830...850 HV 0,025. Таким образом, эффективность от применения МИО в большей степени характерна для партии сверл с исходно повышенным количеством аустенитной фазы. Вместе с тем высокий уровень микротвердости обработанной МИО стали Х6ВМФ может быть вызван как фазовым $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением, так и дополнительным упрочнением поверхности сверла вследствие деформации его поверхностного слоя под действием давления, вызванного взаимодействием импульсного магнитного поля, создаваемого внешним источником, с током, индуцируемым этим полем в обрабатываемой детали [13].



1, 4, 6, 9 — ленточка (режущая кромка); 2, 3, 7, 8 — спинка; 5, 10 — канавка

Рисунок 2. — Контрольные точки измерения микротвердости на исходном (а) и обработанном (б) шлифе сверла (Ø 10 мм) из стали Р6М5

Т а б л и ц а 2. — Значения микротвердости образцов сверл (10 мм) из стали Р6М5

Образец	Точка измерения	HV 0,01
Обработанный	1	820
	2	670
	3	800
	4	700
	5	800
	Среднее значение	750
Исходный	6	670
	7	650
	8	650
	9	630
	10	710
	Среднее значение	660

Обнаруженное явление фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при МИО связано с двумя причинами. Как показано в работах [14; 15], наложение магнитного поля приводит к смещению температуры фазового равновесия ΔT , которое выражается уравнением Кривоглаза—Садовского:

$$\Delta T = T_0 \frac{\Delta M \Delta H}{q}, \quad (1)$$

где ΔT — смещение температуры начала мартенситного превращения (M_n);

T_0 — температура равенства (фазового равновесия) свободных энергий мартенсита и аустенита;

ΔM — разность магнитных моментов мартенсита и аустенита;

ΔH — прирост напряженности магнитного поля H ;

q — теплота $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения.

Таким образом, наложение магнитного поля расширяет температурную область существования ферромагнитной фазы и смещает температуры T_0 и M_n , что приводит к дополнительному превращению аустенита в мартенсит [15].

Результаты расчетов из работы [15] показывают, что смещение температур T_0 , M_n в постоянных магнитных полях низкой напряженности составляет $7 \div 10$ °С. В сверхсильных и импульсных магнитных полях сдвиг температуры равновесия может составлять $30 \dots 60$ °С, что должно приводить к существенному уменьшению количества остаточного аустенита в инструментальных сталях.

Таким образом, обнаруженное явление фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при МИО связано со смещением температуры начала мартенситного превращения M_n [14; 15], а также с деформацией поверхности обрабатываемого материала, что также может сопровождаться эффектом деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и упрочнением стали [16].

Интересно отметить, что проведение МИО сталей сопровождается сдвигом дифракционных линий от матричных α - и γ -фаз в сторону меньших углов рассеяния (см. рисунок 1). Указанное явление может быть связано с появлением сжимающих напряжений в поверхностном слое обработанных МИО изделий вследствие деформации поверхностного слоя сталей при протекании в них мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. Формирование сжимающих напряжений в поверхностных слоях сталей приводит к увеличению сопротивления зарождению и распространению микротрещин при трении и циклическом нагружении материала [13].

Полученные результаты свидетельствуют о комплексном воздействии МИО: за счет создаваемого давления на близкие ко внутренней поверхности индуктора точки сверла (см. рисунок 2: 1, 4 — ленточка; 2, 3 — спинка), а также вследствие тепловых эффектов (разогрева сверла) на участках с цилиндрической формой, удобных для протекания индукционных токов (5 — канавка).

Таким образом, при МИО изделий с повышенным содержанием аустенитной фазы важную роль играет проведение одной серии импульсов (количество импульсов, величина энергии обработки), позволяющей создать расчетные термодинамические условия обработки. Например, для диаметров сверл $10 \dots 20$ мм серия МИО представляет собой порядка 7 импульсов с энергией обработки 10 кДж.

Заключение. Исследовано влияние МИО осевого режущего инструмента из инструментальных сталей Р6М5 и Х6ВМФ на содержание в них остаточного аустенита и на микротвердость режущей части сверла. Установлено, что для стали Х6ВМФ количество аустенитной фазы железа уменьшается от 78 до 62 %. При этом микротвердость увеличилась от 550 до $830 \dots 850$ HV 0,025.

Показано, что обработка импульсным магнитным полем сверла из стали Р6М5 приводит к незначительному уменьшению процента остаточного аустенита с 26 до 23 %. В то же время микротвердость (среднее значение) увеличилась на 14 %.

Установлено, что наложение магнитного поля приводит к сдвигу температур фазового равновесия и начала мартенситного превращения, что вызывает существенное уменьшение количества остаточного аустенита в инструментальных сталях. Взаимодействие импульсного магнитного поля, создаваемого внешним источником, с током, индуцируемым этим полем в обрабатываемой детали, приводит к деформации поверхностного слоя под действием давления, что также сопровождается эффектом деформационно-активированного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и упрочнением α -фазы.

Указанные результаты позволяют сделать вывод, что МИО характеризуется комплексным воздействием на обрабатываемый инструмент.

Список цитированных источников

1. Верещака, А. С. Некоторые тенденции развития технологической производственной среды / А. С. Верещака // СТІН. — 2009. — № 8. — С. 12—19 ; № 9. — С. 9—14.
2. Шадуя, В. Л. Современные методы обработки материалов в машиностроении : учеб. пособие / В. Л. Шадуя. — Минск : Техноперспектива, 2008. — 314 с.

3. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А. Г. Бойцов [и др.]. — М. : Машиностроение, 1991. — 144 с.
4. Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы II Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3—5 окт. 2007 г. : в 2 ч. / редкол.: С. А. Астапчик [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, М-во промышленности Респ. Беларусь, Гос. ком. по науке и технологиям Респ. Беларусь. — Минск : Экоперспектива, 2007. — Ч. 1. — 204 с.
5. Гитлевич, А. Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский. — Кишинев : Штиница, 1985. — 196 с.
6. Технология нанесения покрытий на основе карбида титана ЭИО деталей с СВС-реагентами / О. П. Речут [и др.] // Литье и металлургия. — 2007. — № 1 (41). — С. 145—153.
7. Акимов, В. В. Повышение свойств быстрорежущей стали для режущего инструмента / В. В. Акимов, П. В. Петунин, О. Ю. Бургонова // Машиностроение и материаловедение. — 2014. — № 2. — С. 27—30.
8. Орлов, А. С. Повышение работоспособности режущих инструментов путем упрочнения импульсной магнитной обработкой : дис. ... канд. техн. наук : 25.05.12 / А. С. Орлов. — Иваново, 2012. — 185 л.
9. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. — 2012. — № 3. — С. 77—82.
10. Прутки и полосы из быстрорежущей стали : ГОСТ 19265-73. — Введ. 10.12.73. — М. : Изд-во стандартов, 1973. — 22 с.
11. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. — М. : Металлургия, 1983. — 527 с.
12. Гуляев, А. П. Металловедение : учеб. для вузов / А. П. Гуляев. — 6-е изд., перераб. и доп. — М. : Металлургия, 1986. — 544 с.
13. Алифанов, А. В. Магнитно-импульсная обработка стальных изделий / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Цианенко // Перспективные материалы и технологии. — Витебск : Изд-во ВГТУ. — 2013. — Гл. 25. — С. 520—543.
14. Садовский, В. Д. Остаточный аустенит в закаленной стали / В. Д. Садовский, Е. А. Фокина. — М. : Наука, 1986. — 112 с.
15. Природа влияния магнитных полей на температуру начала мартенситного превращения в сплавах железа / В. М. Счастливцев [и др.] // Физика твердого тела. — 2016. — Т. 58, вып. 2. — С. 327—335.
16. Бланк, В. Д. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении / В. Д. Бланк, Э. И. Эстрин. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 412 с.

Поступила в редакцию 25.03.2022.

УДК 621.926

А. І. Наліўко¹, С. І. Русан¹, кандыдат тэхнічных навук, дацэнт,
Л. А. Сівачэнка², доктар тэхнічных навук, прафесар, **Т. Л. Сівачэнка³**

¹Установа адукацыі «Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт», вул. Войкава, 21, 225404 Баранавічы,
Рэспубліка Беларусь, +375 (33) 699 45 01, alehnaliuko@mail.ru

²Міждзяржаўная адукацыйная ўстанова вышэйшай адукацыі «Беларуска-Расійскі ўніверсітэт», пр-т Міру, 43,
212000 Магілёў, Рэспубліка Беларусь, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

³Унітарнае прыватнае вытворчае прадпрыемства «КБ «Прамысловыя тэхналогіі і комплексы»»,
вул. Грушаўская, 32, 212003 Магілёў, Рэспубліка Беларусь, +375 (44) 453 88 08 tatsianamail.86@gmail.com

МЕТОДЫКА НАБЛІЖАНАГА АНАЛІЗУ СІЛОВОГА ЎЗАЕМАДЗЕЙНЯ Ў ЗДРАБНЯЛЬНЫХ МАШЫНАХ СА ШЧОТКАПАДОБНЫМІ ЗВЁНАМІ

Выкладзена методыка вызначэння сродкамі тэарэтычнай механікі рэактыўных сіл узаемадзеяння рабочых звёнаў машыны з часціцай здрабняльнай фракцыі матэрыялу. Паказана магчымасць выкарыстання атрыманых вынікаў для пераходу да ўдасканаленай (дэфарматыўнай) мадэлі ўзаемадзеяння.

Ключавыя словы: методыка; стрыжань; здрабненне; вугал ахопу; драцяны элемент; здрабняльная машына.
Рис. 5. Бібліягр.: 4 назваў.

O. I. Naliuko¹, S. I. Rusan¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
L. A. Sivachenko², DSc in Technical Sciences, Professor, **T. L. Sivachenko³**

¹Educational Institution "Baranovich State University", 21 Voykov Str., 225404 Baranovich,
the Republic of Belarus, +375 (33) 699 45 01, alehnaliuko@mail.ru

²Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", 43 Mira Ave.,
212000 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (222) 70 36 78, 228011@mail.ru

³Unitary Private Production Enterprise "DB 'Industrial technologies and complexes'", 32 Grushevskaya Str.,
212003 Mogilev, the Republic of Belarus, +375 (44) 453 88 08, tatsianamail.86@gmail.com

METHOD OF APPROXIMATE ANALYSIS OF FORCE INTERACTION IN GRINDING MACHINES WITH BRUSH-LIKE LINKS

The method of determination by means of theoretical mechanics of the reactive forces of the working brush-like links interaction of the machine with a particle of the crushed fraction of the material is described. The possibility of using the obtained results for the transition to an improved (deformative) interaction model is shown.

Key words: technique; rod; grinding; angular velocity; coverage angle; wire element; grinding machine.

Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Уводзіны. Устойлівае развіццё прамысловасці не магчыма без інавацыйнага абнаўлення тэхналагічнай сферы і стварэння высокаэфектыўных тэхналогій, машын і абсталявання. У сучасных умовах найбольшае практычнае значэнне маюць тыя механізмы ўздзеяння, якія непасрэдна звязаны з комплекснай перапрацоўкай сыравіны і матэрыялаў, прызначанай для атрымання прадуктаў, неабходных для задавальнення жыццёвых запатрабаванняў чалавека.

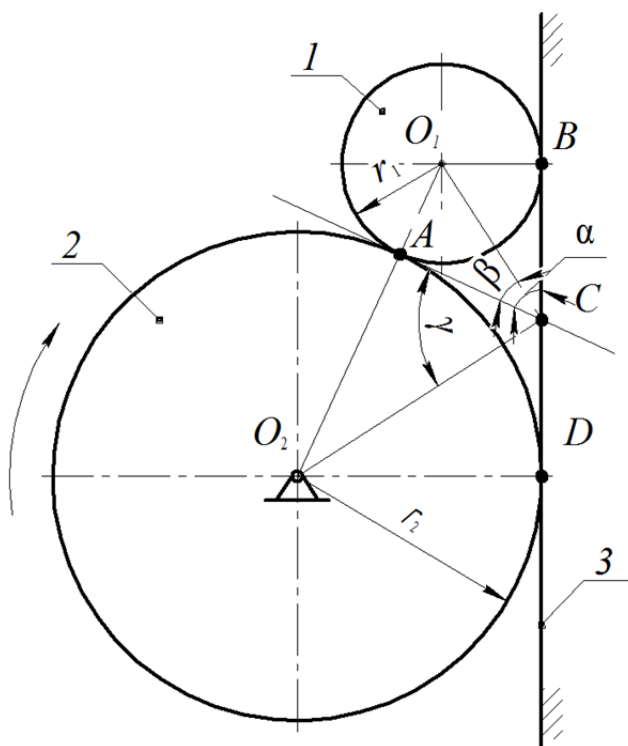
Важнай уласцівасцю для здрабняльнага абсталявання новага пакалення з'яўляецца забеспячэнне яго адаптыўнасці да перапрацоўкі розных па сваіх характарыстыках матэрыялаў.

Вызначальнай умовай пры стварэнні новых канструкцый здрабняльных машын з'яўляецца гатоўнасць навукова-метадычнай базы для іх праектавання і магчымасці камплектацыі базавых вузлоў і рабочых органаў на аснове асвоеных прамысловасцю вырабаў.

Матэрыялы і метады даследавання. Тыпы здрабняльных машын і тэхналогіі перапрацоўкі матэрыялаў апісаны ў манаграфіі [1]. У нашым даследаванні засяродзім увагу на прыватнай канструкцыі машыны з рабочымі звёнамі, паверхні якіх выраблены ў выглядзе драцяных шчотак. Фрагмент прынцыповай схемы такой машыны паказаны на rysunku 1, дзе лічбамі 1, 2, 3 абазначаны, адпаведна, часцінка рэчыва, рухомая шчотка і нерухомае шчака. Як бачым, часцінка мадэліруецца ідэальным шарыкам радыуса r_1 (на rysunku яна для зручнасці даследавання значна павялічана). Такая мадэль найлепш характарызуе грануляваныя фракцыі матэрыялаў. Свабодныя канцы дроцікаў цыліндрычнай шчоткі 2 знаходзяцца на адлегласці r_2 ад восі яе вярчэння. Мяркуем, што геаметрычныя параметры r_1 , r_2 сістэмы на ўваходзе часцінкі ў зону разбурэння застаюцца нязменнымі. Рэчыва, што здрабняецца, знаходзіцца ў абмежаванай прасторы над шчоткай. Пры яе вярчэнні часцінкі рэчыва захопліваюцца дроцікамі шчоткі, уцягваюцца ў зону разбурэння, дзе здрабняюцца (ці сціраюцца ў парашок). Пры магчымасці ўдакладнення разліковая схема будзе напісана напрыканцы даследавання.

Вынікі даследавання і іх абмеркаванне. Устанавім неабходныя ў далейшым аналігічныя залежнасці паміж лінейнымі і вуглавымі параметрамі механічнай сістэмы 1—2—3 (гл. rysunaк 1). Вугал α паміж датычнымі CA і CB да экватэрыяльнай паверхні часцінкі з вяршыняй у пункце іх перасячэння C будзем называць вуглом ахопу часцінкі. Яму адпавядае дуга AB з цэнтральным вуглом AO_1B ($\angle AO_1B \leq \pi$). Паводле rysunaкa 1 $\angle ABC + \angle ACD = \pi$, пры гэтым $\beta = \angle ABC / 2 = \alpha / 2$, $\gamma = \angle ACD / 2$. Таму $\beta + \alpha = \pi / 2$. У прамавугольным трохвугольніку O_1CO_2 адрэзак CA перпендыкулярны да гіпатэнузы O_1O_2 , што дазваляе запісаць суадносіны $r_1 / AC = AC / r_2$. Памножым іх на r_1 / AC , атрымаем $(r_1 / AC)^2 = r_1 / r_2$ ці $\rho = r_1 / r_2$. Адсюль знаходзім

$$\alpha = 2 \arctg(\sqrt{\rho}). \quad (1)$$



Рысунак 1. — Рабочыя звёны здрабняльнай машыны (2, 3)

З формулы (1) відаць, што вугал ахопу α часцінкі залежыць выключна ад суадносін ρ радыусаў r_1, r_2 . А калі ўлічыць, што ў дзеючай машыне $r_2 = \text{const}$, а змяняцца могуць толькі размеры часцінак, то вугал α можна разглядаць як функцыю толькі іх параметра r_1 . Для нагляднасці на рысунку 2 прадстаўлены графік змянення вугла α у межах $r_1 = (0,1 \dots 0,4) r_2$. Як бачым, залежнасць (1) блізкая да лінейнай; $r_1 \rightarrow 0$, вугал $\alpha \rightarrow 0$.

Пераходзім да аналізу сілавого ўзаемадзеяння ў здрабняльнай машыне. Павольны рух часцінкі падчас уваходжання ў кантакт са звёнамі 2, 3 будзем лічыць раўнамерным. Гэта дазваляе ігнараваць сілы інерцыі і вызначаць яе сілы ўзаемадзеяння са звёнамі 2, 3 з умоў раўнавагі. Паводле metodyкі, выкладзенай у курсе тэарэтычнай механікі [2; 3], аб'ектам раўнавагі ў сістэме 1—2—3 з'яўляецца часцінка 1; сувязямі, накладзенымі на яе, служаць паверхні звёнаў 2, 3 у пунктах A, B . Рэакцыі сувязей (сілы ўзаемадзеяння часцінкі са звёнамі 2, 3) на рысунку 3 абазначаны літарамі N_A, S_A, N_B, S_B і прыкладзены да часцінкі 1. Такія ж сілы процілеглага напрамку дзейнічаюць на звёны 2, 3. Да актыўных сіл належаць: сіла цяжару часцінкі і сілы ціску рэчыва, што змешчана ў прасторы над часцінкай. Актыўныя сілы вызначаюцца асобна і ў нашай задачы лічацца зададзенымі. Прыводзім іх да цэнтра O_1 , атрымліваем раўнадейную P і пару сіл з момантам M (гл. рысунак 3). Вугал θ знаходзіцца ў працэсе прывядзення сістэмы актыўных сіл да цэнтра O_1 . Заўважым, што часцінка 1 пры павароце шчоткі 2 можа ўцягвацца ў зону разбурэння, а можа і заставацца нерухомай (ці выслізгваць са звёнаў 2, 3). Гэта залежыць як ад вугла ахопу α , так і ад дзеючых на часцінку сіл. Значэнне α , пры якім часцінка пад дзеяннем прыкладзеных да яе сіл рухаецца ў зону разбурэння (ці застаецца ў раўнавазе), называюць вуглом захопу. Ён таксама вылічваецца па формуле (1) з дадатковымі ўмовамі, накладзенымі на сістэму сіл. Далей будзем лічыць, што гэтыя ўмовы выконваюцца.

Уводзім сістэму восей каардынат O_1x і запісваем умовы раўнавагі:

$$\sum X_i = 0; \sum Y_i = 0; \sum M(O_1) = 0. \quad (2)$$

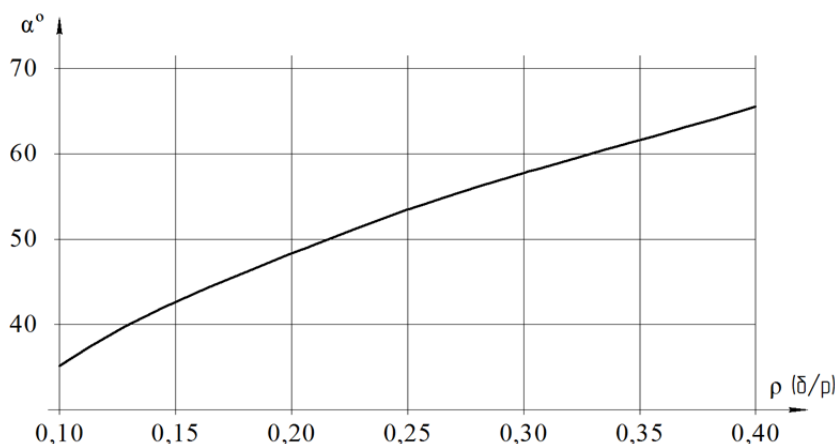
Улічваем, што $S_A = fN_A$. Як бачым, задача статычна вызначальная. Карыстаючыся рысункам 3, запісваем умовы (2) у разгорнутым выглядзе:

$$P_B N_A - N_B + P \sin \theta = 0; \quad (3)$$

$$P_C N_A - S_B + P \cos \theta = 0; \quad (4)$$

$$f r_1 N_A - S_B r_1 - M = 0, \quad (5)$$

дзе f — каэфіцыент трэння ў пункце A .



Рысунак 2. — Ілюстрацыя залежнасці вугла ахопу α ад суадносін радыусаў ρ

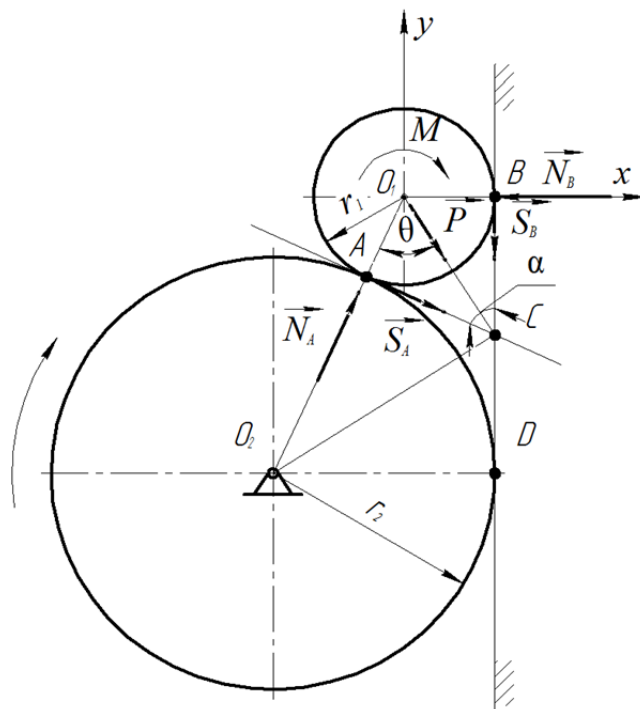


Рисунок 3. — Схема сил взаємодії робочих зв'язків машини з часцінкою рамы

З роўнасці (5) $S_B = fN_A - M / r_1$ падстаўляем S_B у (4):

$$fN_A - P \cos \theta + M / r_1 = 0.$$

Атрымліваем выраз

$$N_A = Q / P_A. \quad (6)$$

Падстаўляем N_A у роўнасць (3). З атрыманага выражэння знаходзім

$$N_B = (P_B / P_A)Q + P \sin \theta. \quad (7)$$

Далей з ураўнення (4) атрымліваем

$$S_B = (P_C / P_A)Q + P \cos \theta. \quad (8)$$

І, як раней адзначалася,

$$S_A = f(Q / P_A). \quad (9)$$

Карыстаючыся ўмовамі раўнавагі і rysункам 3, знаходзім

$$P_A = \sin \alpha - (1 + \cos \alpha)f; P_B = \cos \alpha + f \sin \alpha; P_C = \sin \alpha - f \cos \alpha; Q = P \cos \theta - M / r_1. \quad (10)$$

Для прадстаўлення сіл взаємодзеі (6)...(9) у выглядзе функцыі радыуса часцінкі r_1 неабходна ў формулах (10) перайсці ад вугла захопу α да параметра $t = r_1 / r_2$ праз $\tan(\alpha / 2)$. У папулярным даведніку па матэматыцы [4] формулы пераходу ад $\sin \alpha$, $\cos \alpha$ да $\tan(\alpha / 2)$ адсутнічаюць. Каб іх знайсці, выкарыстоўваем прыведзеную ў згаданым выданні залежнасць $t = \tan(\alpha / 2) = \sqrt{(1 - \cos \alpha) / (1 + \cos \alpha)} = \sin \alpha / (1 + \cos \alpha)$. Атрымаем $\sin \alpha = 2t / (1 + t^2)$, $\cos \alpha = (1 - t^2) / (1 + t^2)$. Формулы (10) прымуць наступны выгляд:

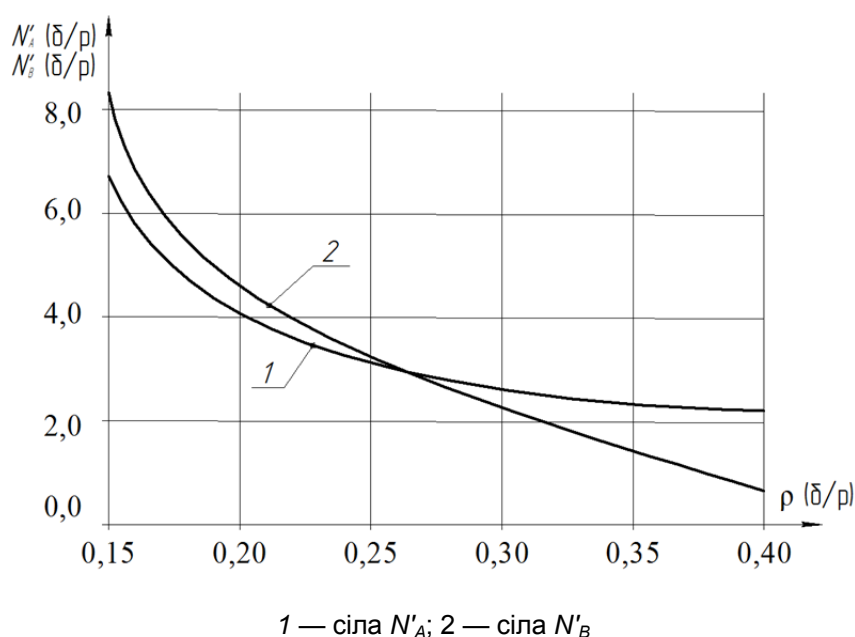
$$P_A = 2(t - f) / (1 + t^2); P_B = (1 + 2ft - t^2) / (1 + t^2); P_C = [2t - f(1 - t^2)] / (1 + t^2).$$

Цяпер велічыні P_A, P_B, P_C , а значыць, і сілы ўзаемадзеяння (6)...(9) можна разглядаць як функцыі суадносін ρ , а пры $r_2 = \text{const}$ — як функцыі радыуса часцінкі r_1 . Заўважым, што кампаненты сіл узаемадзеяння, прыкладзеныя ў пунктах A, B , па-рознаму ўплываюць на разбурэнне часцінкі. Датчыныя да яе паверхні сілы S_A, S_B выклікаюць пераважна сціранне, нармальныя N_A, N_B — драбненне. Далей спынімся больш падрабязна на нармальных складальных N_A, N_B . Разгледзім прыватны выпадак, пры якім знешнія сілы, прыкладзеныя да часцінкі, прыводзяцца да раўнадзейнай $Q = P$ ($M = 0$). Прымем $\theta = 0$, тады формулы (6), (7) прымуць наступны выгляд:

$$N_A = P / P_A; N_B = (P_B / P_A)P. \quad (11)$$

Каб скласці ўяву, як змяняюцца сілы (11) у залежнасці ад радыуса r_1 пры знешнім уздзеянні P , на рысунку 4 пабудаваны іх графікі на інтэрвале $r_1 = (0,1 \dots 0,4)r_2$ (пры $f = 0,3$) у безразмерных каардынатах $N'_A = N_A / P$, $N'_B = N_B / P$. Паводле іх раўнавага адносна большай часцінкі забяспечваецца меншымі нармальнымі сіламі. Якасна такі вынік можна абгрунтаваць клінавым эфектам: большай часцінцы і, значыць, большаму вуглу α адпавядае болей затуплены клін з меншым сілавым распорам паверхняў 2, 3. Звернем увагу на недахоп графікаў, прадстаўленых на рысунку 4. Яны пабудаваны пры $P = \text{const}$. Мяркуецца, што велічыня P выбіраецца для некага сярэдняга значэння ρ на выбраным інтэрвале яго змянення. На самой справе раўнадзейная знешніх сіл з'яўляецца бесперапыннай функцыяй размераў часцінкі, г. зн. параметра ρ . Як адзначалася вышэй, яна залежыць ад ціску з боку сумежных часцінак, у меншай ступені — ад сілы цяжару самой часцінкі.

Каб забяспечыць неабходныя для драбнення рэчыва ўласцівасці ігольчастых звёнаў здрабняльных машын (жорсткасць і трываласць іголак), патрэбна больш дасканалая разліковая схема, чым выкарыстаная вышэй (гл. рысункі 1, 3). Яна павінна ўлічваць, найперш, дэфарматыўнасць ігольчастых паверхняў рабочых звёнаў. Сапраўды, кантакт часцінкі 1 са звёнамі 2, 3 мае месца не ў пунктах A, B , а па сферычных паверхнях (лунках). На плоскім рысунку 5, a , гэтыя паверхні ў павялічаным выглядзе прадстаўлены дугамі EAF, KBL . Пры вылічэнні сіл узаемадзеяння габарыты рабочых звёнаў абмяжоўваюцца зрушанымі паверхнямі. На плоскім рысунку 5, a , яны паказаны пункцірнымі лініямі $a-a, b-b$.



Рысунк 4. — Адносныя нармальныя сілы ўзаемадзеяння

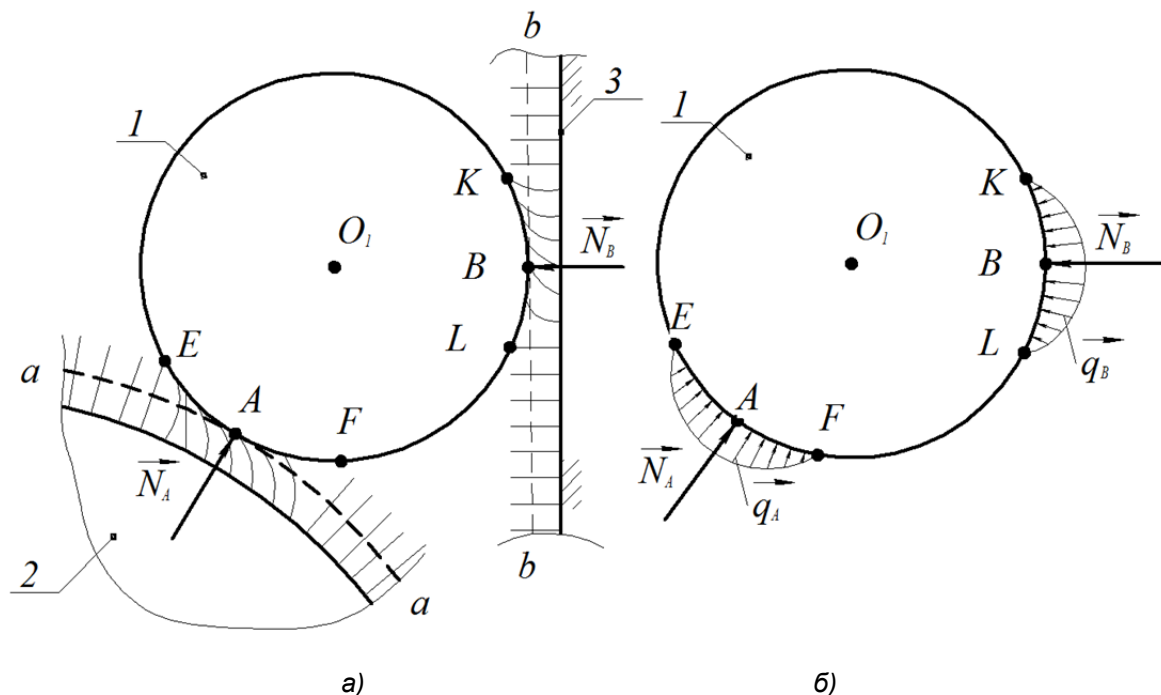


Рисунок 5. — Дэформацыя ігольчастых паверхняў шчоткі 2 і шчакі 3 (а), адпаведныя ёй сілавыя ўздзеянні q_A, q_B на часцінку 1 (б)

Аднак неістотнае змяненне радыуса r_2 (гл. рысункі 1, 3) на практыцы можна ігнараваць. Знойдзеныя раней сілы N_A, N_B ва ўдакладненай разліковай схеме не з'яўляюцца засяроджанымі, а ўяўляюць раўнадзейныя размеркаваных нагрузак q_A, q_B (гл. рысунок 5, б). Прыведзеная канкрэтызацыя сіл узаемадзеяння дазваляе больш дакладна даследаваць напружана-дэфармаваны стан часцінкі. А паколькі такія ж нагрузкі q_A, q_B , але процілеглага напрамку, прыкладзены і да звёнаў 2, 3, то адкрываецца магчымасць вызначыць дэформацыі і даследаваць трываласць іх ігольчастых паверхняў.

Заклучэнне. У выкананым даследаванні выкладзена метадыка набліжанага вызначэння сіл узаемадзеяння ігольчастых рабочых звёнаў машыны з элементарнай часцінкай здрабняльнай фракцыі. Атрыманыя рэзультаты дазваляюць перайсці да паглыбленага вывучэння як тэхналагічнага працэсу драблення, так і да ўдасканалення структуры ігольчастых пакрыццяў рабочых органаў машыны.

Спіс цытаваных крыніц

1. Інтенсифікацыя тэхналагічных працэсав у апаратах адаптыўнага дзеяння : калектыв. моногр. / Л. А. Сиваченко [і др.] ; пад науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во асветы Респ. Беларусь, Барановіч. гос. ун-т. — Барановічы : БарГУ, 2020. — 359 с.
2. Чигарев, А. В. Курс тэарэтычнай механікі / А. В. Чигарев, Ю. В. Чигарев. — Мінск : Новое знанне ; М. : ЦУПЛ, 2010. — 397 с.
3. Хвясёко, Г. М. Курс тэарэтычнай механікі / Г. М. Хвясёко. — Мінск : БДТУ, 2000. — 354 с.
4. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М. : Гос. изд. техн.-теор. лит., 1957. — 608 с.

Паступіў у рэдакцыю 01.04.2022.

УДК 621.89.097.2

А. А. Пивоварчик¹, кандидат технических наук, доцент,**А. К. Гавриленя**², кандидат технических наук, доцент,**А. С. Корольков**¹¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Ожешко, 22, 230021 Гродно, Республика Беларусь, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by²Государственное научное учреждение «Институт экономики Национальной академии наук Беларуси», Национальная академия наук Беларуси, ул. Россиянова, 50, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 22 259 33, AndrejGavrilenya@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИНТЕТИЧЕСКИХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Целью настоящей работы является исследование кинематической вязкости и щелочного числа синтетических моторных масел в зависимости от пробега легкового автомобиля.

Научная новизна работы состоит в получении новых экспериментальных данных по изменению кинематической вязкости и щелочного числа синтетических моторных масел отечественных и импортных марок при увеличении пробега транспортного средства.

Введение содержит краткую информацию о требованиях, предъявляемых к кинематической вязкости и щелочному числу синтетических моторных масел, которые используются в бензиновых двигателях внутреннего сгорания легковых автомобилей.

В основной части описана методика проведения исследований по определению кинематической вязкости моторных масел, измеренной при 40 и 100 °С, и щелочного числа в зависимости от величины пробега транспортного средства. Установлено, что для бензиновых двигателей легковых автомобилей марки Skoda Rapid целесообразно использовать синтетические моторные масла марок «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и Motul SAE 5W-30 X-Clean. Это обусловлено тем, что в процессе эксплуатации автомобиля исследуемые эксплуатационные показатели данных масел снижаются менее интенсивно, что, в свою очередь, свидетельствует о более высоком качестве масел.

Результаты исследований будут полезны инженерам-механикам при выборе синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях внутреннего сгорания, в целях увеличения надежности и работоспособности основных узлов двигателя.

Ключевые слова: бензиновый двигатель; автомобиль; моторное масло; вискозиметр; кинематическая вязкость; щелочное число; пробег.

Рис. 3. Библиогр.: 10 назв.

A. A. Pivovarchyk¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**A. K. Haurilenia**², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**A. S. Korolkov**¹¹Educational Institution “Yanka Kupala State University of Grodno”, 22 Ozhashko Str., 230021 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 876 68 24, Pivovarchik_AA@grsu.by²State Scientific Institution “Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus”, 50 Russiyanova Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 22 259 33, AndrejGavrilenya@mail.ru

RESEARCH OF PERFORMANCE OF SYNTHETIC MOTOR OILS INDICATORS USED IN GASOLINE ENGINES OF PASSENGER CARS

The purpose of this work is to study the kinematic viscosity and the alkaline number of synthetic motor oils depending on the mileage of a passenger car.

The scientific novelty of the work is in obtaining new experimental data on changes in the kinematic viscosity and the alkaline number of synthetic motor oils of domestic and imported brands with an increase in vehicle mileage.

The introduction contains brief information about the requirements for the kinematic viscosity and alkaline number of synthetic motor oils used in gasoline internal combustion engines of passenger cars.

The main part describes the methodology for conducting research to determine the kinematic viscosity of motor oils, measured at 40 and 100 °C, and the base number depending on the mileage of the vehicle. It has been established that it is advisable to use synthetic Lukoil Lux SAE 5W-40 and Motul SAE 5W-30 X-Clean engine oils for Skoda Rapid passenger car gasoline engines. This is due to the fact that during the operation of the car, the studied performance indicators of these oils decrease less intensively, which in turn indicates a higher quality of oils.

The results of the research will be useful to mechanical engineers when choosing synthetic engine oils used in gasoline internal combustion engines in order to increase the reliability and operability of the main engine components.

Key words: gasoline engine; car; engine oil; viscometer; kinematic viscosity; base number; mileage.

Fig. 3. Ref.: 10 titles.

Введение. Кинематическая вязкость и щелочное число являются важнейшими эксплуатационными показателями, характеризующими функциональное назначение моторного масла. Кинематическая вязкость представляет собой отношение динамической вязкости к плотности моторного масла при идентичной температуре. Кинематическая вязкость оказывает влияние на поступление моторного масла в зазоры основных узлов трения двигателя (цилиндропоршневая группа, коленчатый вал), создание гидродинамического режима трения в данных узлах, легкость пуска двигателя при низких температурах, механические потери в двигателе, расход топлива, интенсивность изнашивания двигателя и т. д. [1—4]. Щелочное число указывает на время, в течение которого моторное масло способно нейтрализовать вредные для него кислоты, которые вызывают коррозионный износ деталей двигателя и усиливают процессы образования различных углеродистых отложений. Для нейтрализации вредных кислот в моторное масло вводят присадку — гидроксид калия.

Согласно требованиям ГОСТ 10541-78 «Масла моторные универсальные и для автомобильных карбюраторных двигателей. Технические условия», кинематическая вязкость универсальных моторных масел при 100 °C, используемых в бензиновых двигателях внутреннего сгорания, при легких условиях эксплуатации транспортного средства должна находиться в пределах от 5,6 до 6,5 сСт, при тяжелых условиях работы — не менее 12 сСт. В работе [5] установлено, что кинематическая вязкость синтетического моторного масла для бензиновых двигателей при 100 °C должна находиться в пределах от 6 до 10 сСт, а при 40 °C — не ниже 75 сСт, что обеспечивает высокую работоспособность двигателя. В свою очередь, в работе [3] указывается на то, что для увеличения срока службы бензинового двигателя кинематическая вязкость синтетического моторного масла при 100 °C должна находиться в пределах от 8,0 до 12,0 сСт.

В странах Европы и США не рекомендуется использовать моторные масла со значением щелочного числа более 6 мг · КОН / г, а в странах СНГ принято использовать моторные масла, щелочное число которых — не менее 9 мг · КОН / г.

Для определения сроков службы моторного масла в двигателях внутреннего сгорания ряд авторов рекомендует использовать браковочные показатели, при достижении которых моторное масло следует заменить [3; 4]. Браковочные показатели для значения щелочного числа и кинематической вязкости соответствуют следующим значениям: увеличение значения кинематической вязкости на 25 % и уменьшение первоначального значения более чем на 20 %. Авторы работ [5; 6] считают, что замену моторного масла следует проводить при снижении показателя кинематической вязкости на 30 % и более.

Условия эксплуатации механических транспортных средств могут быть весьма различными. По причине износа элементов двигателя внутреннего сгорания, нарушения температурного режима работы и других факторов степень снижения эксплуатационных свойств моторных масел существенно возрастает, что требует корректировки установленных заводом-изготовителем сроков замены моторного масла. В связи с этим представляет интерес исследование изменения кинематической вязкости, измеренной при 40 и 100 °C, и щелочного числа моторных масел в целях уточнения их фактических сроков замены [7—10].

Материалы и методы исследования. Исследование прошли используемые в бензиновых двигателях внутреннего сгорания синтетические моторные масла марок Motul SAE 5W-30 X-Clean (Франция), Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40 (Британия—Нидерланды), «Лукойл Люкс SAE 5W-40» (Россия), «Нафтан Премьер SAE 5W-40» (Беларусь). Выбор обусловлен тем, что данные моторные масла централизованно закупаются и используются при обслуживании легковых автомобилей специализированными станциями по обслуживанию подвижного состава Республики Беларусь. Выбранные для исследований моторные масла заливались в новые легковые автомобили марки Skoda Rapid (12 автомобилей), оборудованные бензиновым двигателем (4 цилиндра) с распределенным впрыском топлива объемом $1\,598\text{ см}^3$. За результат исследования принималось среднее арифметическое значение кинематической вязкости, полученное после отбора по одной пробе из трех автомобилей и проведения трех измерений. Перед проведением исследований осуществлялась компьютерная диагностика каждого автомобиля. Установлено, что двигатели легковых автомобилей полностью исправны, в частности, проверено натяжение ремня газораспределительного механизма, тепловые зазоры, исправность стартера, генератора, приборов системы зажигания и питания, напряжение бортовой сети — 12,4 В. Моторное масло в двигатель легкового автомобиля заливалось в объеме 3,6 л.

Отбор проб моторного масла осуществлялся на прогретом двигателе через несколько минут после его остановки. Образцы масел после проведения экспериментов по исследованию кинематической вязкости заливали обратно в двигатели автомобилей. Доливание моторного масла в двигатель не проводилось вследствие того, что перед проведением исследований объем залитого масла соответствовал максимальному уровню по щупу. Необходимо отметить, что перед отбором проб образца осуществлялся контроль фактического уровня моторного масла в двигателе [7].

Кинематическую вязкость моторного масла исследовали в соответствии с требованиями, изложенными в ГОСТ 33-2000 «Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости». Сущность метода по определению кинематической вязкости заключалась в измерении комбинированным стеклянным вискозиметром ВПЖ-4 с диаметром капилляра 1,47 мм времени истечения определенного объема моторного масла под воздействием силы тяжести при постоянной температуре. Для нагрева и поддержания необходимой температуры исследований (40 и 100 °С) использовался термостатирующий прибор «Термостат А2» [7—10].

Кинематическую вязкость моторного масла определяли по формуле

$$\nu = \Pi t, \quad (1)$$

где Π — калибровочная постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2 / \text{с}^2$; для вискозиметра ВПЖ-4 $\Pi = 0,3\text{ мм}^2 / \text{с}^2$;

t — время истечения образца из вискозиметра, с.

Щелочное число определялось с использованием иономера И-160МИ в соответствии с требованиями ГОСТ 30050-93 «Нефтепродукты. Общее щелочное число. Метод потенциометрического титрования хлорной кислотой».

Результаты исследования и их обсуждение. Полученные экспериментальные данные по изменению кинематической вязкости синтетических моторных масел при температуре 40 °С показывают, что исследуемый показатель с увеличением пробега легкового автомобиля снижается у всех четырех исследуемых масел (рисунок 1). При пробеге автомобиля до 15 тыс. км кинематическая вязкость при 40 °С моторного масла Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40 уменьшается с 87,42 до 58,94 сСт, моторного масла марки Motul SAE 5W-30 X-Clean — с 69,1 до 52,7 сСт. При использовании моторных масел марки «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и «Нафтан Премьер SAE 5W-40» данный показатель снижается с 77,8 до 60,6 сСт и с 85,5 до 61,4 сСт соответственно.

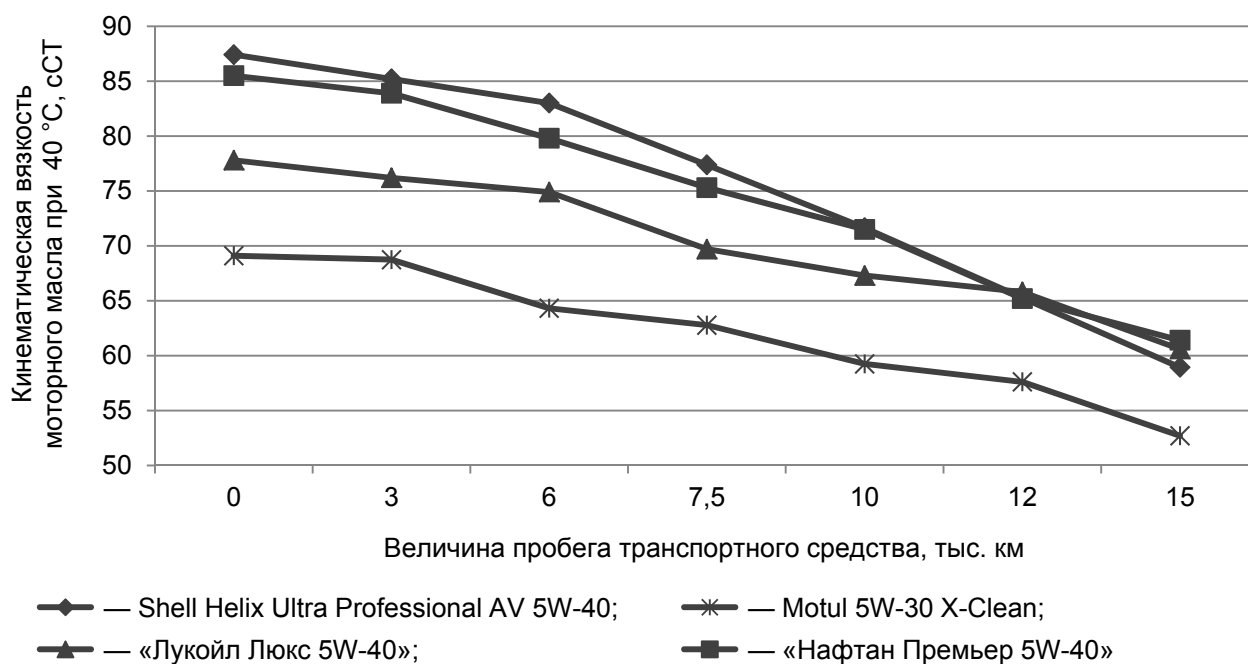


Рисунок 1. — Результаты исследования кинематической вязкости при 40 °С синтетических моторных масел

Установлено, что при пробеге транспортным средством 10 тыс. км кинематическая вязкость моторного масла Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40, измеренная при 40 °С, уменьшилась на 18,1 %, моторных масел Motul SAE 5W-30 X-Clean — на 14,3 %, «Лукойл Люкс SAE 5W-40» — на 20,0 %, «Нафтан Премьер SAE 5W-40» — на 16,4 %. При этом наиболее интенсивное снижение кинематической вязкости исследуемых моторных масел при 40 °С происходит при пробеге транспортного средства от 7,5 до 15 тыс. км. При рекомендуемом для замены масла пробеге транспортного средства (15 тыс. км) кинематическая вязкость при 40 °С моторного масла Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40 в сравнении с исходным значением уменьшилась на 32,6 %, моторных масел Motul SAE 5W-30 X-Clean, «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и «Нафтан Премьер SAE 5W-40» — на 23,8; 22,1 и 28,2 % соответственно.

Результаты исследований показывают, что при пробеге автомобилем 15 тыс. км кинематическая вязкость, измеренная при 100 °С, моторного масла Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40 уменьшается с 13,1 до 7,4 сСт, а моторного масла Motul SAE 5W-30 X-Clean — с 11,9 до 8,1 сСт (рисунок 2). При использовании моторных масел «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и «Нафтан Премьер SAE 5W-40» данный показатель снижается с 13,5 до 8,3 сСт и с 14,7 до 8,2 сСт соответственно. Установлено, что при пробеге транспортным средством 10 тыс. км кинематическая вязкость моторного масла Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40, измеренная при 100 °С, уменьшилась на 16,8 %, при использовании моторных масел марок Motul SAE 5W-30 X-Clean, «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и «Нафтан Премьер SAE 5W-40» — на 17,4; 11,6 и 11,1 % соответственно. Следует отметить, что снижение кинематической вязкости при 100 °С моторного масла марки Motul SAE 5W-30 X-Clean носит практически линейный характер.

Таким образом, при пробеге транспортного средства, который рекомендуется для замены масла (15 тыс. км), кинематическая вязкость при 100 °С моторного масла Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40 в сравнении с исходным значением уменьшилась на 43,6 %, а при использовании моторных масел Motul SAE 5W-30 X-Clean, «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и «Нафтан Премьер SAE 5W-40» — на 32,0; 38,6 и 44,3 % соответственно.

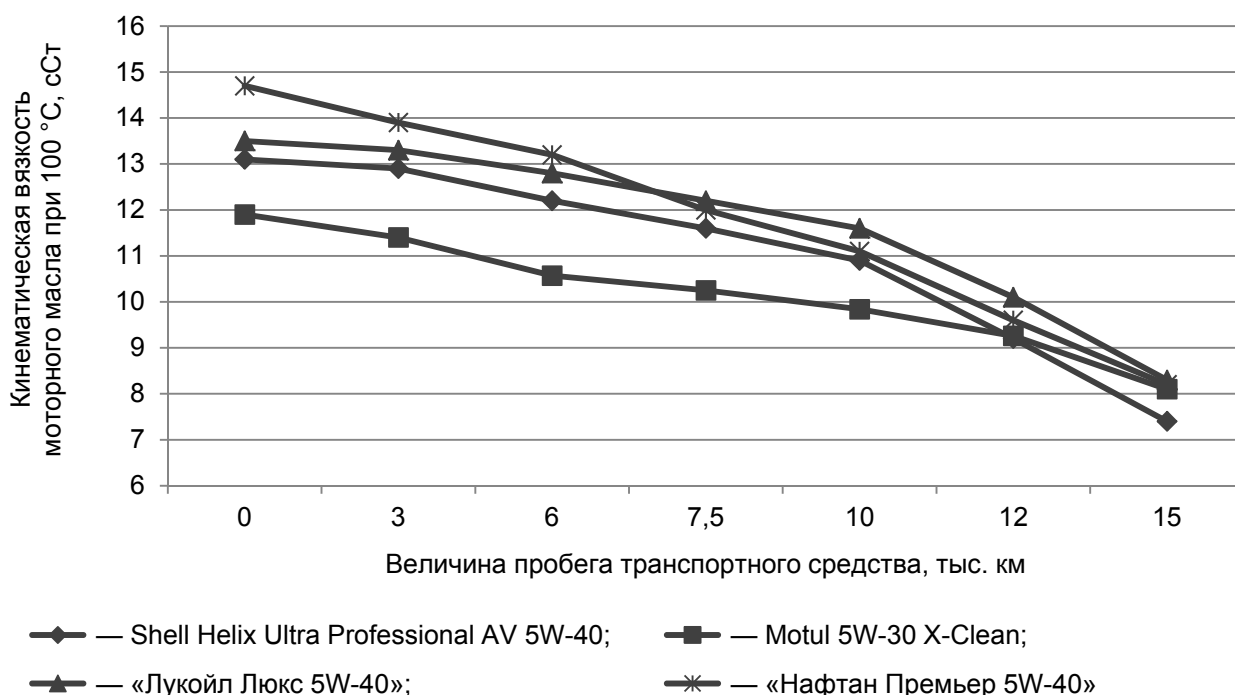


Рисунок 2. — Результаты исследования кинематической вязкости при 100 °C синтетических моторных масел

Снижение кинематической вязкости, как правило, связано с неисправностью отдельных узлов или системы двигателя (неполное сгорание топливно-воздушной смеси, утечка из системы питания в моторное масло топлива (бензина)). Установлено, что кинематическая вязкость моторного масла марки Motul SAE 5W-30 X-Clean, измеренная при 100 °C, при пробеге транспортным средством 15 тыс. км снижается менее интенсивно, чем у других исследуемых масел, т. е. уменьшается на 11,6 п. п. менее интенсивно по сравнению с моторным маслом Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40, на 6,6 и 12,3 п. п. менее интенсивно, чем при использовании моторных масел «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и «Нафтан Премьер SAE 5W-40» соответственно.

Представленные на рисунке 3 экспериментальные данные показывают, что щелочное число моторного масла Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40 при пробеге транспортным средством 15 тыс. км уменьшилось на 6,02 мг · КОН / г. Установлено, что существенное изменение щелочного числа (с 9,78 до 6,21 мг · КОН / г) наблюдается при пробеге от 5 до 10 тыс. км. При увеличении пробега с 10 до 15 тыс. км через каждые последующие 2,5...3,0 тыс. км щелочное число в среднем снижается на 0,45 мг · КОН / г.

Экспериментально установлено, что при пробеге 15 тыс. км щелочное число моторного масла Motul 5W-30 X-Clean уменьшилось на 3,4 мг · КОН / г. Наиболее интенсивное снижение значения щелочного числа моторного масла Motul 5W-30 X-Clean происходит в интервале пробега от 10 до 15 тыс. км. При этом щелочное число снижается со значения 8,3 до 6,8 мг · КОН / г, что составляет почти 15 % от первоначального значения для данного моторного масла. Результаты исследований показывают, что щелочное число моторных масел марок «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и «Нафтан Премьер SAE 5W-40» при пробеге транспортным средством 15 тыс. км уменьшилось на 3,5 мг · КОН / г.

Проведенные исследования показали, что при пробеге транспортным средством 15 тыс. км щелочное число моторного масла Shell Helix Ultra Professional AV SAE 5W-40 в сравнении с исходным значением уменьшилось почти на 66,0 %. При использовании моторных масел марок Motul SAE 5W-30 X-Clean, «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и «Нафтан Премьер SAE 5W-40» щелочное число после 15 тыс. км пробега снизилось на 33,0; 32,5 и 38,7 % соответственно.

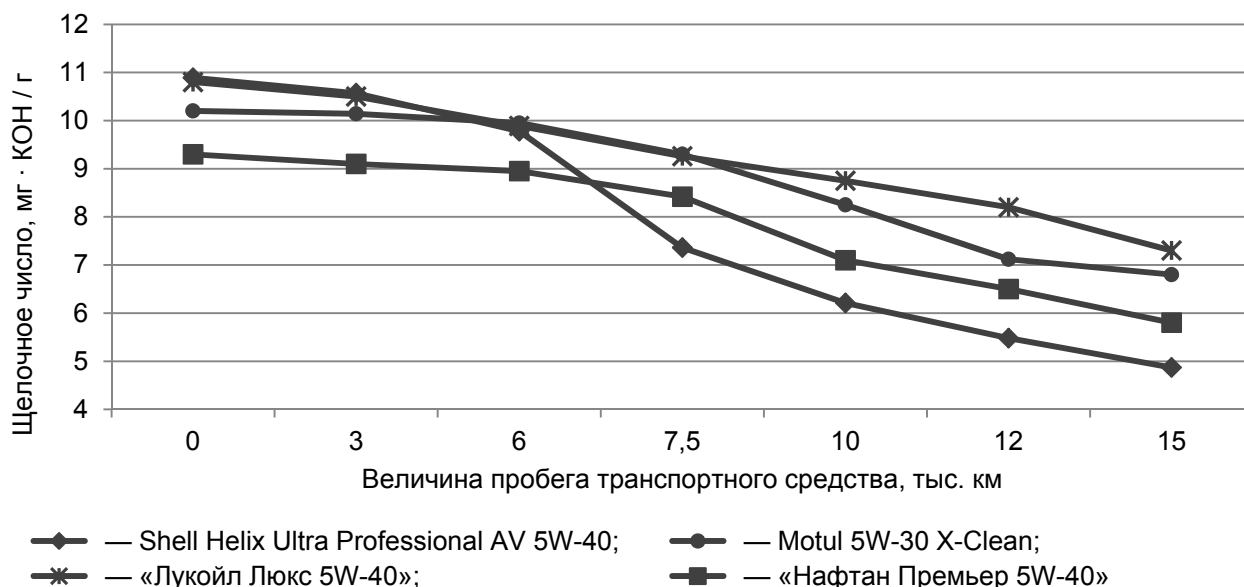


Рисунок 3. — Результаты исследования щелочного числа синтетических моторных масел

Заключение. Установлено, что для бензиновых двигателей легковых автомобилей марки Skoda Rapid целесообразно использовать синтетические моторные масла марок «Лукойл Люкс SAE 5W-40» и Motul SAE 5W-30 X-Clean. Это обусловлено тем, что с увеличением пробега автомобиля кинематическая вязкость и щелочное число данных масел снижаются менее интенсивно.

Список цитированных источников

1. Влияние условий эксплуатации автомобилей на ресурс работы моторного масла / И. И. Ширлин [и др.] // Вестн. Сиб. гос. автомобил.-дорож. акад. — 2013. — Вып. 4 (32). — С. 42—45.
2. Пивоварчик, А. А. Исследование температурно-вязкостных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в дизельных двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. И. Сергей // Весн. Гродз. дзярж. ун-та імя Я. Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2019. — Т. 9, № 1. — С. 78—87.
3. Шпак, Е. Д. Физико-химические показатели качества моторного масла / Е. Д. Шпак, В. И. Митрофанова // Вестн. Амур. гос. ун-та. Сер. «Естественные и экономические науки». — 2019. — № 85. — С. 103—106.
4. Долгова, Л. А. Обеспечение рационального ресурса моторного масла в двигателях / Л. А. Долгова, В. В. Салмин // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. — 2012. — № 2 (74). — С. 146—156.
5. Корнеев, С. В. Оценка достоверности прогнозирования периодичности смены моторного масла в двигателях / С. В. Корнеев, А. П. Серков // Ом. науч. вестн. — 2014. — № 1. — С. 62—65.
6. Чудиновских, А. Л. Разработка научных основ химмотологической оценки автомобильных моторных масел : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / А. Л. Чудиновских ; Рос. гос. ун-т нефти и газа (Нац. исслед. ун-т) им. И. М. Губкина. — М., 2016. — 50 с.
7. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных показателей синтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях легковых механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. С. Корольков, Н. Н. Алифировец // Весн. ГрДУ імя Я. Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 21—27.
8. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных свойств полусинтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях внутреннего сгорания легковых автомобилей модели Volkswagen Polo Sedan / А. А. Пивоварчик, О. Д. Заболотный // Весн. ГрДУ імя Я. Купалы. Сер. 6 : Тэхніка. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 25—33.
9. Пивоварчик, А. А. Исследование вязкостно-температурных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях механических транспортных средств / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, О. Д. Заболотный // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 1 (9). — С. 70—76.
10. Пивоварчик, А. А. Исследование эксплуатационных показателей полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40, используемых в бензиновых двигателях / А. А. Пивоварчик, А. К. Гавриленя, О. Д. Заболотный // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2021. — № 1 (9). — С. 77—84.

Поступила в редакцию 14.03.2022.

УДК 621.926.6

Ю. М. Фадин, кандидат технических наук,
О. М. Шеметова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», ул. Костюкова, 46,
308012 Белгород, Российская Федерация, 8 (920) 572 98 89, olga95kizilova@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Современная экономическая обстановка требует пересмотреть уже существующую материально-сырьевую базу в строительстве, а также возможность для ее трансформации и использования в будущем. Для достижения заданных целей необходимо создание новых видов строительных материалов, более эффективных и недорогих в своем ценовом диапазоне по сравнению с существующими. К данному направлению можно отнести развитие сухих строительных смесей. Высокое качество сухих строительных смесей гарантируется стабильностью их состава и свойств используемых ингредиентов. Экономия времени при их использовании позволит получить безупречный конечный результат. Важным процессом при изготовлении сухих строительных смесей является процесс смешивания, который также включает подготовку сырья, дозирование и распределение химических добавок. Одним из главных и самых важных качеств, определяющих качество готовой продукции, является однородность готовой смеси. Поэтому в производственной линии особое внимание уделяется секции смешивания. Разнообразию сыпучих материалов и их свойств способствует создание различных типов смесителей для качественного перемешивания компонентов. В статье рассматривается история появления сухих строительных смесей и смесительного оборудования для производства.

Ключевые слова: пневмосмеситель; смешивание; строительные смеси; вихревое смешивание; смеситель; совершенствование.

Рис. 2. Библиогр.: 10 назв.

Yu. M. Fadin, PhD in Technical Sciences,
O. M. Shemetova

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Belgorod State Technological University
named after V.G. Shukhov”, 46 Kostyukova Str., 308012 Belgorod, Russian Federation,
8 (920) 572 98 89, olga95kizilova@gmail.com

THE USE OF PNEUMATIC MIXING EQUIPMENT FOR THE DRY BUILDING MIXES PRODUCTION

The current economic situation requires a review of existing material and raw materials base in construction, as well as the possibility for its transformation and use in the future. To achieve these goals, it is necessary to create new types of building materials that are more efficient and inexpensive in their price range compared to existing ones. The development of dry building mixes can be attributed to this direction. The high quality of dry building mixes is guaranteed by the stability of their composition and the properties of the ingredients used. Saving time when using them will allow getting a flawless result. An important process in the manufacture of dry building mixes is the mixing process, which also includes the preparation of raw materials, dosing and distribution of chemical additives. One of the main and most important qualities determining the quality of the finished product is the finished mixture uniformity. Therefore, special attention in the production line is paid to the mixing section. The variety of bulk materials and their properties contributes to the creation of various types mixers for high-quality components mixing. The history of dry building mixes and mixing equipment appearance for production is discussed in the article.

Key words: pneumatic mixer; mixing; building mixtures; vortex mixing; mixer; improvement.

Fig. 2. Ref.: 10 titles.

Введение. Момент появления сухих строительных смесей (далее — ССС) относится к началу XX века — времени открытия способа промышленного производства водорастворимой целлюлозы и ее производных (производные с водоудерживающими качествами). Такие способности производных целлюлозы позволили создавать смеси, которые можно наносить тонким слоем. Следующий этап появления ССС — введение в раствор полимеров, например, клея ПВА. Он увеличивал подвижность и пластичность смеси, что влияло на скорость работы и удобство при нанесении. Во второй половине прошлого века было начато производство редиспергируемых полимеров и сополимеров, что явилось еще одним витком в развитии ССС. Редиспергируемые полимеры — это мельчайшие капельки вещества, окруженные водорастворимой оболочкой. При добавлении жидкости оболочка растворяется, полимер высвобождается и включается в структуру раствора. В начале 90-х годов на рынке появляются первые упакованные ССС в мешках для широкой продажи, до этого времени пользовались растворами собственноручного приготовления или заводскими. В данный период времени мы не можем обойтись без применения сухих смесей: они задействованы как в строительстве, так и в реконструкции зданий и помещений. Качество ССС зависит от видов компонентов их гранулометрического состава, а качество смешения компонентов играет большую роль [1—3].

Материалы и методы исследования. Однородность материала является основой требуемого качества современных строительных смесей. Именно по этой причине смесительный блок по праву считается наиболее ответственным участком заводов по производству ССС. Выбор смесительного оборудования является важнейшим шагом на пути высококачественного продукта. Смесителем называют оборудование, при помощи которого можно приготовить однородную смесь, состоящую из двух и более компонентов [1—3].

В современном мире смесительное оборудование довольно разнообразно. Они делятся по принципу действия, конструктивным особенностям и даже по типу среды, в которой они работают (рисунок 1). Смесители также различаются процессом перемешивания, он может быть периодическим и непрерывным. Смесители могут работать при различных физических воздействиях, например, механических, струйных, пневматических, статических, импульсных, вибрационных, ультразвуковых, магнитных и др. [1; 2].

У всех этих смесителей есть свои достоинства и недостатки. Например, в таких смесителях, как ленточные, планетарно-шнековые, барабанные, одним из преимуществ является возможность смешивания больших объемов, но при этом они имеют такой недостаток, как повышенное энергопотребление и металлоемкость. В смесителях, где вращающиеся части выступают в качестве рабочего органа, невозможно перемешивать абразивный материал, а также необходимо защищать эти элементы от абразивной пыли и часто менять накладки на рабочих органах. Несмотря на такое количество недостатков, существуют смесители, у которых есть масса достоинств [3]. На рисунке 1 показаны смесители для современных производств ССС [1—3].



Рисунок 1. — Смесители для современных производств ССС:
а — планетарно-шнековые; б — ленточные; в — барабанные; г — U-образные

Из всего разнообразия смесительных агрегатов наше внимание привлекло пневматическое перемешивание, которое в отличие от других видов смешивания характеризуется большими скоростями энергоносителя с компонентами смеси [3]. При этом у таких смесителей есть преимущества над другими смесительными аппаратами: простота их конструкции; гомогенизация больших объёмов (до 200 м^3); смешивание высокоабразивных и хрупких материалов; отсутствие «мертвых» зон; малый износ рабочей поверхности. Смеситель может работать как в периодическом цикле, так и в непрерывном. Пневмосмеситель может создать завихренно-турбулентный поток в объеме смеси за время от 15 до 30 с, такое же время потребуется для оседания частиц после окончания работы пневмосмесителя [4]. Смесители вихревого типа используются для приготовления прочных и высокопрочных песчано-глинястых смесей в литейной промышленности. Постоянная аэрация смеси во время смешения улучшает ее формуемость и уплотняемость, разрешает готовить высокопрочные смеси до 2 МПа при сохранении производительности смесителя [4]. Существует несколько видов современных пневмосмесителей (рисунок 2) [5].

Одним из разновидностей являются пневмосмесители с размещенными лопастями тихоходных мешалок или скребком над аэрирующей решеткой (см. рисунок 2, а). Существуют смесители и с воздействием на перемешиваемый материал сквозь воздушные струи по принципу эрлифта (рисунок 2, б) или пневмосмеситель непрерывной подачи струй энергоносителя через полый вал и полости лопастей с перфорированной пластиной, расположенных под решеткой и вращающихся вокруг вертикальной оси (см. рисунок 2, в) [5].

Пневмосмеситель можно использовать не только в строительной индустрии, но и в нефтехимической промышленности, в стекольной промышленности, фармацевтической и др. [5]. Объем рынка, где применяются пневмосмесители, в Российской Федерации включает в себя: цемент (57,9 млн т в год), пигменты (140 тыс. т в год), ССС (9,6 млн т в год), полимеры (10,1 млн т в год), лекарства (171,1 млн т в год).

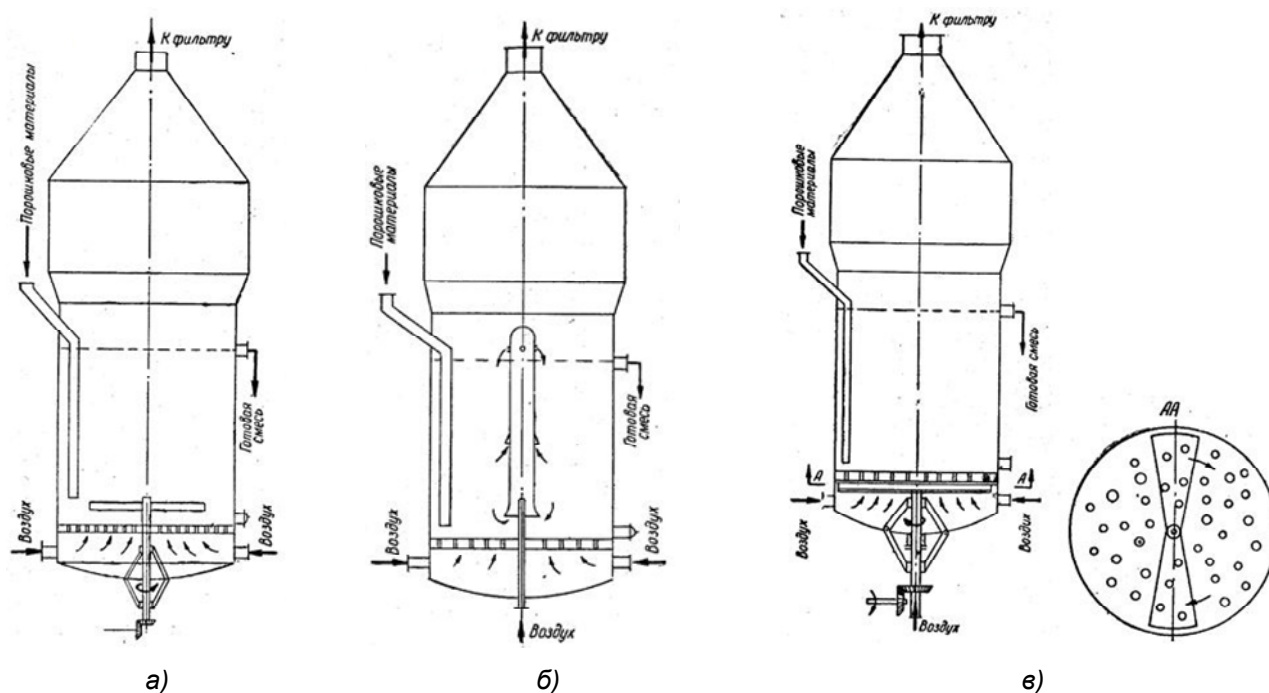


Рисунок 2. — Классификация пневмосмесителей: а — с добавочной мешалкой; б — по принципу эрлифта; в — пневмосмеситель с вращающимся воздухораспределителем

Результаты исследования и их обсуждение. Главным параметром качественной работы пневмосмесителя является определение степени однородности готового продукта, которая обуславливается равномерным распределением всех ее компонентов по всему объему готового продукта.

Степень однородности в момент перемешивания S определяет, насколько будет качественной смесь на выходе из пневмосмесителя. Моментом перемешивания является центральный абсолютный момент статистической плотности распределения физической плотности компонентов смеси по всему рассматриваемому объему [6]:

$$S = \frac{1}{V \sum \rho_{\text{см}}} \sum_m \sum_n |\rho_i - \bar{\rho}_i| \Delta V_e, \%,$$

где V — объем смеси;

$\rho_{\text{см}}$ — средняя плотность смеси;

m — количество компонентов смеси;

n — количество элементарных участков смеси;

ρ_i — плотность i -го компонента на данном участке смеси;

ΔV_e — средняя плотность i -го компонента.

Интенсивность перемешивания характеризуется:

– временем, которое затрачивается на процесс перемешивания;

– мощностью, затраченной на процесс перемешивания, приведенный к одному объёму или массе готового продукта.

Интенсивность перемешивания как критерий можно определить как скорость изменения степени смешивания во времени: di / dt .

Скорость смешивания представляет собой уменьшение степени однородности и служит критерием интенсивности процесса смешивания:

$$(dS / dx)' = -k_1 S. \quad (1)$$

Скорость смешивания пропорциональна разности масс и текущему значению степени однородности:

$$(dS / dx)'' = k_2 (S_{\text{max}} - S). \quad (2)$$

Анализ интегральной формы процесса смешивания, который включает в себя смешивание, описывается формулой

$$S = a + (S_{\text{max}} - a) e^{-kx}, \%, \quad (3)$$

где S — центральный абсолютный момент статистической плотности распределения физической плотности компонентов смеси по всему рассматриваемому объему;

a и k — постоянные, которые характеризуют перемешивание и зависят от физических параметров компонента;

x — показывает движение компонентов в смесительном агрегате (который прямо пропорционален времени, затрачиваемому на перемешивание t , частоте воздействия n механизма на компоненты и количественные составляющие движения компонентов Z , т. е. $x = ntZ$) [7].

Во время выбора смесительного агрегата или его проектирования нужно также учитывать удельную потребляемую мощность, которую можно определить как количество энергии, затрачиваемой на количество материала в процессе перемешивания.

На процесс перемешивания и качество готовой смеси влияют еще и другие факторы, например, гранулометрический состав компонентов, дозировка и т. д. Поэтому мы можем сделать вывод об отсутствии конкретной зависимости при смешении компонентов [8; 9].

В формулах (1)...(3) постоянные a и k — константы, характеризующие перемешивание и зависящие от физических параметров, состояния компонентов и работы узла перемешивания, которые можно найти методами математической статистики [10].

Заключение. Рынок смесительного оборудования перенасыщен своим разнообразием оборудования и способами перемешивания. Несмотря на это, пневматический способ перемешивания сухих компонентов очень популярен за счет ряда существенных преимуществ перед другими: гомогенизация больших объемов (до 200 м³), смешивание высокоабразивных и хрупких материалов, отсутствие «мертвых» зон. Для производства сухих смесей важна производительность и качество выпускаемой продукции на предприятии. Использование этих смесителей повысит степень однородности готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания, а также приведет к увеличению производительности.

Список цитированных источников

1. Современное состояние и перспективы развития производства сухих строительных смесей в России / Э. Л. Большаков [и др.] // Современные технологии сухих смесей в строительстве : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. — 2000. — С. 3—5.
2. Корнеев, В. И. Сухие строительные смеси / В. И. Корнев. — М. : РИФ «Стройматериалы», 2010. — 320 с.
3. Орехова, Т. Н. Направления конструктивно-технологического совершенствования пневмосмесителей для производства строительных материалов / Т. Н. Орехова, А. М. Агарков, А. А. Голубятников // Науч. альм. — 2015. — № 3. — С. 124—127.
4. Дергунов, С. А. Сухие строительные смеси (состав, технология, свойства) : учеб. пособие / С. А. Дергунов, С. А. Орехов. — Оренбург : ОГУ, 2012. — 106 с.
5. Орехова, Т. Н. Пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих строительных смесей / Т. Н. Орехова. — Белгород, 2013. — 158 с.
6. Лоскутьев, Ю. А. Механическое оборудование предприятий по производству вяжущих строительных материалов / Ю. А. Лоскутьев, В. М. Максимов, В. В. Веселовский. — М. : Машиностроение, 1986. — 378 с.
7. Энциклопедия по машиностроению. Общезаводское оборудование [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://studfile.net/preview/7493544/page:15>. — Дата доступа: 20.10.2020.
8. Плотников, В. А. Разработка и исследование новых смесительных агрегатов непрерывного действия для мелкодисперсных твердых материалов : дис. ... канд. техн. наук / В. А. Плотников. — М. : МИХМ, 1981. — 189 л.
9. Денисов, Г. А. Производство и использование сухих строительных смесей / Г. А. Денисов // Сухие строит. смеси. — 2011. — С. 14—18.
10. Богданов, В. С. Механическое оборудование предприятий промышленности стройматериалов : учеб. пособие / В. С. Богданов. — Белгород : БелГТАСМ, 1996. — 102 с.

Поступила в редакцию 30.04.2021.

УДК 621.78.001, 621.81

А. А. Шматов, доктор технических наук, доцентБелорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск,
Республика Беларусь, +375 (29) 377 73 57, shmatovalexander@gmail.com

ХАРАКТЕР УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ПРИ ТЕРМОГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Изучаемый процесс термогидрохимической обработки включает: 1) гидрохимическую обработку сплава в вододисперсионной $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$ среде; 2) термообработку. Сформулированы научные принципы создания метода термогидрохимической обработки: а) реализация механизмов получения покрытий с метастабильной структурой, обладающей повышенными свойствами; б) обработка инструментальных сплавов в условиях воздействия кипящей водной дисперсионной среды для создания высокого химического градиента и генерации импульсов термо- и гидродавления; в) реализация механизмов формирования твердосмазочных покрытий, препятствующих адгезионному схватыванию, и др. Триботехнические исследования показали, что влияние процесса термогидрохимической обработки на коэффициент трения твердого сплава носит детерминированный по времени характер упрочнения. Проведена оптимизация термогидрохимической обработки, что позволило в 3,8...4,2 раза снизить коэффициент трения без смазки сплава ВК6 по сравнению с исходным состоянием. Установлен двойной эффект упрочнения твердых сплавов при термогидрохимической обработке за счет осаждения наноструктурированных твердосмазочных покрытий и формирования в подслое высоких напряжений сжатия (до 210...235 МПа), сравнимых с уровнем напряжений, создаваемых методами поверхностной пластической деформации. Разработанная технология повышает в 1,3...4,0 раза стойкость твердосплавных инструментов по сравнению с необработанными.

Ключевые слова: термогидрохимическая обработка; твердый сплав; твердосмазочное покрытие; инструменты.
Рис. 3. Табл. 2. Библиогр.: 12 назв.

A. A. Shmatov, DSc in Technical Sciences, Associate Professor
Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Prospect, 220013 Minsk,
the Republic of Belarus, +375 (29) 377 73 57, shmatovalexander@gmail.com

THE NATURE OF HARD ALLOYS HARDENING DURING THERMOHYDROCHEMICAL TREATMENT

The studied process of thermohydrochemical treatment involves: 1) hydrochemical treatment of surface in a water-dispersive $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$ medium; 2) heat treatment. The scientific principles for the creation of the thermohydrochemical treatment method are formulated: a) the implementation of mechanisms for obtaining coatings with a metastable structure with enhanced properties; b) the processing of tool alloys under the influence of a boiling aqueous dispersion medium to create a high chemical gradient and generate pulses of thermal and hydraulic pressures; c) the implementation of mechanisms for the formation of solid lubricating coatings to prevent adhesive grasping, etc. Tribotechnical researches have shown that the effect of the thermohydrochemical treatment process on the friction coefficient of the hard alloy has a time-deterministic nature of hardening. The optimization of thermohydrochemical treatment of the TC6 hard alloy has been carried out, which made it possible to reduce the friction coefficient without lubrication of the TC6 alloy by a 3.8...4.2 times compared to the initial state. A double effect of hardening of hard alloys during thermohydrochemical treatment due to the deposition of nanostructured solid lubricating coatings and the formation in the sublayer of high compressive stresses (up to 210...235 MPa), comparable to the level of stresses created by the SPD methods, has been established. The developed technology increases the durability of carbide tools by 1.3...4.0 times compared to untreated ones.

Key words: thermohydrochemical treatment; hard alloy; solid lubricating coating; tools.
Fig. 3. Table 2. Ref.: 12 titles.

Введение. В настоящее время потребность в режущих и формообразующих твердосплавных инструментах постоянно растет, поскольку в производстве все больше применяют специальные труднообрабатываемые сплавы и ужесточаются режимы их обработки, однако твердосплавные инструменты пока еще имеют недостаточную стойкость. Решить эту проблему мож-

но путем применения различных способов упрочнения [1]. Наибольший интерес в этом плане представляет процесс термогидрохимической обработки (далее — ТГХО), поскольку он отличается высокой эффективностью, производительностью и применим для готовых к эксплуатации инструментов. Процесс ТГХО включает гидрохимическую обработку (далее — ГХО) инструмента в вододисперсионной среде и последующую термообработку (ТО) [2].

Целью данной работы явилась разработка научно-методологических принципов создания метода ТГХО инструментов, изучение характера упрочнения и практическое применение технологии ТГХО твердых сплавов.

Научные принципы, положенные в основу ТГХО.

1. Прежде всего стояла задача в наибольшей мере реализовать термохимические источники воздействия на инструментальные сплавы, чтобы сформировать в них метастабильные структуры, при которых, согласно теории Дж. Мартина, Р. Доэрти, С. Т. Конобеевского, достигаются наиболее высокие свойства инструментов [3]. В работе сделаны теоретические предположения, что в процессах ТГХО этого можно достичь: а) значительным градиентом химической концентрации дисперсной фазы в насыщающей среде и на обрабатываемой поверхности; б) формированием сильно измельченной структуры твердого осадка, образуемого в насыщающей среде и на обрабатываемой поверхности; в) многократным повторением парожидкостной трансформации водной дисперсионной среды при циклической смене ее агрегатного состояния; г) интенсивным «псевдокавитационным» термогидродинамическим воздействием кипящей водной дисперсионной среды на поверхность инструмента и твердых керамических дисперсных частиц, входящих в состав водной среды.

2. Для создания более высокого химического градиента целесообразно проводить процесс ГХО в жидкой дисперсионной среде. Обязательным условием образования дисперсной системы являются взаимная нерастворимость дисперсной фазы и жидкой среды (воды), а также высокая раздробленность частиц дисперсной фазы. Диспергирование грубодисперсных систем (суспензий) можно осуществлять химическим методом пептизации, добавляя пептизатор (диспергатор), которым может быть поверхностно-активное вещество (далее — ПАВ), электролит или растворитель [4]. При ГХО диспергирование водных грубодисперсных составов (суспензий) осуществляют путем введения ПАВ, что позволяет реализовать эффект П. А. Ребиндера, состоящий в многократном снижении прочности и разрушении твердых частиц за счет адсорбции ПАВ, в результате чего происходит постепенный переход суспензии в коллоидный раствор (гидрозоль).

3. Температура водной дисперсионной насыщающей среды при ГХО должна быть максимально высокой, близкой к кипению, поскольку, согласно А. Энштейну, М. Смолуховскому, броуновское движение дисперсных частиц тем интенсивнее, чем выше температура, меньше размер этих частиц и вязкость среды [5].

4. Проведение процессов ГХО инструментальных сплавов в условиях воздействия кипящей водной дисперсионной среды ускоряет протекание всех физических и электрохимических процессов. В таких средах, насыщенных пузырьками пара, особенно при участии ПАВ, происходит локальное травление с образованием ювенильной поверхности, имеющей высокую реакционную способность формировать наноструктурированные пленки, препятствующие адгезионному схватыванию. Кроме того, в условиях активного кипения жидкости генерируются импульсы давления двух видов: гидродавления, созданного гидродинамическим воздействием среды при движении жидкости в процессе появления, всплытия и исчезновения пузырьков паровой фазы, и термодавления, созданного термодинамическим воздействием среды, связанного с конденсационным схлопыванием пузырьков пара при расширении жидкости за счет поступления в нее теплоты фазового перехода [6].

5. Термогидрохимическая обработка предназначена химически осаждать на поверхности материалов антифрикционные твердосмазочные покрытия, которые обладают резервными возможностями в жестких и катастрофических условиях эксплуатации инструментов [7]. Покрытия могут приобретать твердосмазочные свойства в случаях: а) когда созданы из материалов со слоистой поликристаллической структурой (графит, сульфиды); б) сформированы

на основе нанокристаллических материалов; в) реализуется теория Берналла, согласно которой твердое тело приобретает свойства жидкости, если в кристаллической решетке содержится более 10 % вакансий; г) реализуется эффект Ребиндера, который ведет к пластификации поверхностного слоя и созданию положительного градиента механических свойств в зоне трения; д) реализуется эффект Киркендалла, который приводит к селективному растворению из сплава легирующих элементов из-за различия их электрохимических потенциалов, в результате чего формируется квазижидкая пленка, снижающая коэффициент трения и фрикционный разогрев [8].

Так, ТГХО является наиболее простым методом получения твердосмазочных покрытий. С его помощью можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, углеродных и других антифрикционных материалов [2]. Такие покрытия облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения; в то же время твердость нанокристаллических металлов и тугоплавких соединений возрастает в 2...3 раза [9]. Поскольку после ТГХО исходная структура материала сохраняется (не разупрочняется), а конечные размеры инструментов практически не меняются, термогидрохимически можно обработать готовые к эксплуатации инструменты. С другой стороны, в условиях интенсивной эксплуатации инструмента, когда в зоне трения отсутствует смазка, наилучшим способом снижения трения рабочей кромки инструментов является нанесение твердосмазочных покрытий.

Материалы и методы исследования. Термогидрохимической обработке подвергали твердые сплавы Т15К6 и ВК6. Сам процесс ТГХО осуществляли путем проведения двух операций: а) ГХО сплавов при температуре 95...100 °С в течение 10...60 мин в специально приготовленном вододисперсном составе на базе оксидов титана и молибдена; б) ТО путем нагрева до 120...1035 °С и выдержки в течение 30...60 мин. Вододисперсионную среду готовили путем нанодиспергирования микрочастиц (размером до 5 мкм) TiO_2 и MoO_3 в кипящей суспензии с добавлением в нее 5 % ПАВ (сульфанола). Готовой считалась ванна с кислотностью pH 6...9, которую поддерживали введением NH_4OH . После ГХО проводили нагрев сплавов: в воздушной среде — до 250 °С, а выше этой температуры — под слоем флюса SnCl_2 или B_2O_3 .

Исследования тонкой структуры и микрорельефа поверхности сплавов проводили на атомно-силовом микроскопе Nanoscope 3D (США).

Определение триботехнических свойств твердосплавной поверхности осуществляли на микротрибометре возвратно-поступательного типа по схеме «подвижный шарик — неподвижная плоскость» в паре трения: упрочненная плоскость — сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) при условиях испытаний: нагрузка — 1 Н, длина хода (трека) — 3 мм, скорость — 4 мм / с [2].

Для изучения напряженного состояния твердых сплавов применяли рентгеноструктурный анализ на дифрактометре ДРОН-3.0 в режиме сканирования по точкам в монохроматизированном CuK_α излучении. Расчет напряжений осуществляли по методике одной съемки как сумму напряжений σ_1 , σ_2 по формуле [10] $\sigma_1 + \sigma_2 = -E / \mu [(d_\perp - d_0) / d_0]$, где E — модуль Юнга, μ — коэффициент Пуассона, $d_\perp$ — среднее межплоскостное расстояние для напряженного материала; d_0 — межплоскостное расстояние для ненапряженного материала.

Результаты исследования и их обсуждение. Оптимизация процесса ТГХО. Предварительные триботехнические исследования (рисунок 1) показали, что влияние процесса ТГХО на коэффициент трения твердого сплава без смазки носит детерминированный по времени характер упрочнения в условиях парожидкостной трансформации вододисперсионной среды на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$, как и в других средах на основе SiO_2 , SiC , FeO [2]. Это означает, что максимальное улучшение трибосвойств твердого сплава создается в начальный период ГХО (в данном случае для сплава ВК6 при 15 мин), а затем с увеличением времени его рабочие характеристики снижаются.

В результате многомерной компьютерной оптимизации технологии ТГХО твердого сплава ВК6 достигнуто значительное снижение его коэффициента трения (рисунок 2).

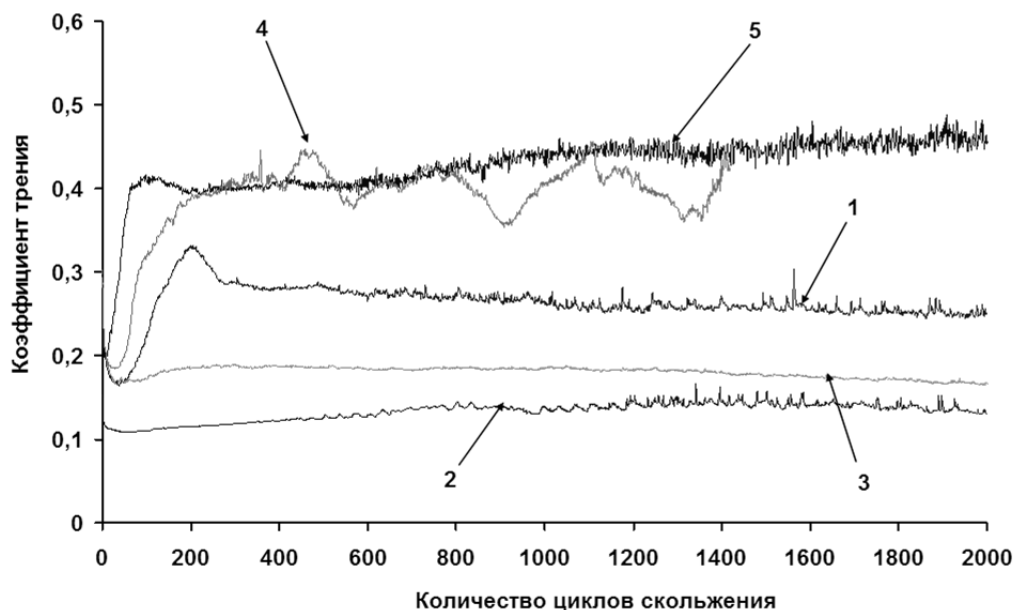
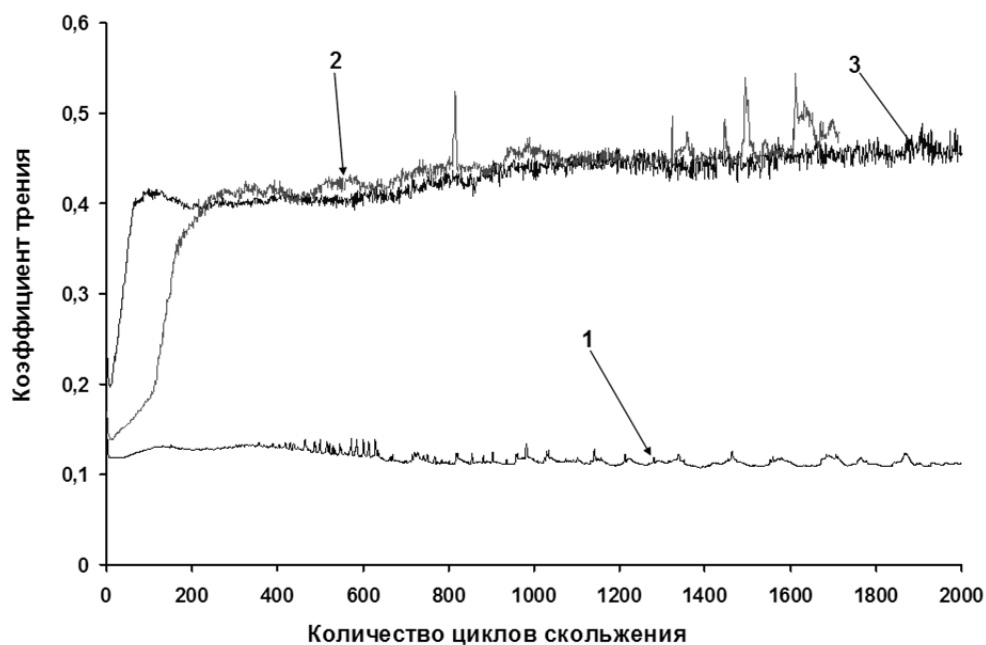


Рисунок 1. — Влияние параметров процесса ТГХО на коэффициент сухого трения сплава ВК6; режим ТГХО: состав водной дисперсионной среды для ГХО на основе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$, варьирование времени ГХО ($T = 100^\circ\text{C}$) при ТО ($T = 1\,000^\circ\text{C}$, $\tau = 10$ мин)

Примечание. Режим ГХО: 1 — 10 мин, 2 — 15 мин, 3 — 30 мин, 4 — 60 мин, 5 — исходный твердый сплав ВК6.



1 — твердый сплав ВК6 после ТГХО в оптимальном режиме и составе на базе $\text{TiO}_2 + \text{MoO}_3$; 2 — твердый сплав ВК6 с Ti-Mo-V карбидным покрытием, полученным при ХТО; 3 — исходный твердый сплав ВК6 (без обработки)

Рисунок 2. — Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения (без смазки) от длительности изнашивания твердого сплава ВК6 до и после ТГХО

Обработка твердого сплава ВК6 по оптимальному режиму (ГХО при 100 °С, 19 мин в водной среде, содержащей дисперсные порошки: 95 % (41 % TiO_2 + 59 % MoO_3) + 5 % ПАВ, затем ТО при 1 035 °С, 15 мин) позволила по сравнению с исходным состоянием существенно (в 3,8...4,2 раза) снизить коэффициент трения твердого сплава при скольжении без смазки: с 0,40...0,44 до 0,106 (см. рисунок 2). Выявлены новые особенности процесса ТГХО: полученные покрытия имеют преимущества перед известными твердосмазочными покрытиями [7], поскольку не требуют приработки и сохраняют минимальные значения коэффициента трения в течение всего времени эксплуатации; наноструктурированные покрытия термически стабильны и даже после нагрева до 1 035 °С имеют низкий коэффициент трения.

Структура. Структурный анализ свидетельствует о том, что покрытия, полученные на твердом сплаве после оптимальной ТГХО, имеют столбчатую структуру (рисунок 3, а) и состоят из неоднородных нанокристаллитов (см. рисунок 3, б, в) на основе комплексных оксидов [2].

Напряженное состояние. Результаты рентгеноструктурного анализа (таблица 1) показали, что после оптимальной ТГХО на поверхности твердых сплавов Т15К6, ВК6 формируется зона сжимающих макронапряжений.

Величина макронапряжений сжатия возрастает в 1,9...2,9 раза (до 210...235 МПа) по сравнению с необработанными сплавами и сравнима с уровнем напряжений, создаваемых методами пластической деформации [11]. Если при холодной пластической деформации сплавов создается плотность дислокаций, равная 10^{10} ... 10^{12} на см^{-2} [12], то при ТГХО число дислокаций существенно не меняется по сравнению с исходным состоянием.

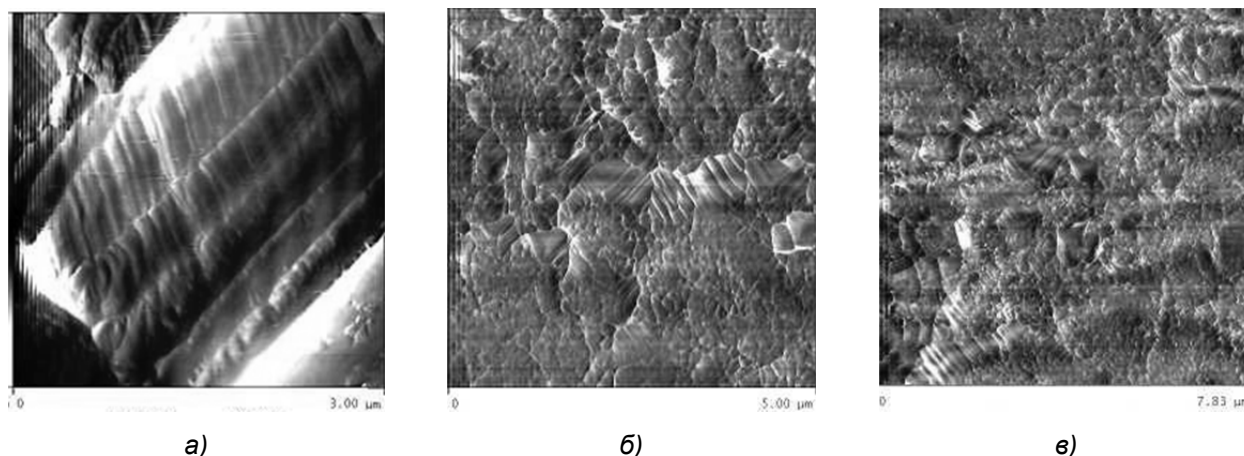


Рисунок 3. — Структура излома покрытия (а) и морфология поверхности (б, в) твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО в оптимальном режиме и составе водной дисперсионной среды на основе TiO_2 + MoO_3

Т а б л и ц а 1. — Результаты рентгеновской съемки стали и твердого сплава

Материал	Режим обработки	Фаза (линия)	$2\theta_{\perp}$, град	$2\theta_0$, град	$d_{\perp}$, нм	d_0 , нм	σ , МПа	Плотность дислокаций, 10^9 см^{-2}
Т15К6	Без обработки	WC (211) [25-1047]	117,30	117,29	0,90206	0,9020	–120	1,84246
	ТГХО		117,26	117,29	0,90212	0,9020	–235	2,47587
ВК6	Без обработки	WC (211) [25-1047]	117,30	117,29	0,90203	0,9020	–71	1,96186
	ТГХО		117,25	117,29	0,90209	0,9020	–210	1,97629

Т а б л и ц а 2. — Результаты испытаний твердосплавных инструментов, подвергнутых ТГХО

Вид инструмента	Вид твердого сплава	Место испытаний	Повышение стойкости инструмента, K_w
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	T15K6	«БЕЛАЗ», «КЗТШ», «АГУ» (Беларусь)	1,8...3,0
	MP4	«БМЗ» (Беларусь)	1,3
	Sandvik CT35, Orion HC6620	«Веза» (Россия)	1,6...1,7
	Karloy PC9030	«Искра» (Россия)	2,2
Режущие пластины для черновой токарной обработки	T15K6	«Мотовело» (Беларусь)	3,0...4,0
	PT40	«БМЗ» (Беларусь)	2,6...3,3
	Kennametal KCU10, Walter WSM20	«НОВОМЕТ-ПЕРМЬ» (Россия)	1,8...3,6
Резцы гальтельные	T15K6	«МПЗ» (Беларусь)	2,0
Торцевые фрезы сборные	MK8	«БМЗ» (Беларусь)	1,6...2,0
	T15K6	«МПЗ» (Беларусь)	2,1
Волоки для металлокорда	Разные марки твердых сплавов	«БМЗ» (Беларусь)	1,4...1,8

Обобщая сказанное, можно заключить, что при ТГХО создается двойной эффект упрочнения: 1) на поверхности твердого сплава осаждается наноструктурированное твердосмазочное покрытие; 2) в подслое формируется зона с полем высоких макронапряжений сжатия, сравнимых с уровнем напряжений, создаваемых при поверхностной пластической деформации (ППД) сплавов.

Результаты производственных испытаний показали, что ТГХО позволяет увеличить стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3...4,0 раза по сравнению с необработанными (таблица 2). Следует отметить, что наивысшие показатели стойкости твердосплавных инструментов достигнуты при черновой токарной и фрезерной обработке специальных сплавов. Технология ТГХО твердых сплавов внедрена в Беларуси на машиностроительных предприятиях «БЕЛАЗ» и «МОТОВЕЛО».

Заключение. Установлен двойной эффект упрочнения твердых сплавов при ТГХО за счет осаждения твердосмазочных наноструктурированных покрытий и формирования в подслое высоких напряжений сжатия, сравнимых с уровнем напряжений, создаваемых методами ППД.

Обработка твердых сплавов по оптимальному режиму ТГХО позволяет снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности при отсутствии смазки с 0,40...0,44 до 0,106 (в 3,8...4,2 раза) по сравнению с исходным состоянием.

Обнаружен и практически реализован детерминированный по времени характер упрочнения твердого сплава при проведении процесса ТГХО.

Разработана простая и экономичная технология ТГХО, использование которой позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3...4,0 раза по сравнению с необработанными.

Список цитированных источников

1. Зенин, Б. С. Современные технологии поверхностного упрочнения и нанесения покрытий / Б. С. Зенин, А. И. Слосман. — Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. — 120 с.
2. Шматов, А. А. Научные и технологические основы термохимических и термоциклических методов упрочняющей обработки металлообрабатывающих инструментов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.01 и 05.02.07 / А. А. Шматов. — Минск, 2020. — 344 л.

3. *Мартин, Дж.* Стабильность микроструктуры металлических систем / Дж. Мартин, Р. Дозрти ; пер. с англ. — М. : Атомиздат, 1978. — 280 с.
4. *Новикова, Е. А.* Коллоидная химия: поверхностные явления / Е. А. Новикова, Г. А. Фролов. — М. : МИСИС, 2016. — 129 с.
5. *Шубенкова, Е. Г.* Физическая и коллоидная химия / Е. Г. Шубенкова. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. — 67 с.
6. *Дорофеев, Б. М.* Звуковые явления при кипении : автореф. ... дис. д-ра физ.-мат. наук : 01.04.14 / Б. М. Дорофеев. — Нальчик, 1994. — 53 с.
7. *Григорьев, А. Я.* Твердые смазки / А. Я. Григорьев, Н. К. Мышкин // Химия и жизнь. — 2014. — № 1. — С. 34—39.
8. *Полюшкин, Н. Г.* Основы теории трения, износа и смазки / Н. Г. Полюшкин. — Красноярск : Изд-во Краснояр. гос. аграр. ун-та, 2013. — 192 с.
9. *Адашкин, А. М.* Материаловедение и технология металлических, неметаллических и композиционных материалов / А. М. Адашкин, А. Н. Красновский. — М. : Форум, 2018. — 592 с.
10. *Анисович, А. Г.* Рентгеноструктурный анализ в практических вопросах материаловедения / А. Г. Анисович. — Минск : Беларус. наука, 2017. — 207 с.
11. *Климова, Л. Г.* Формирование технологических остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании / Л. Г. Климова // Вестн. ИрГТУ. — 2011. — № 4. — С. 33—37.
12. *Мацевитый, В. М.* О залечивании дефектов в металлах при пластической деформации / В. М. Мацевитый, К. В. Вакуленко, И. Б. Казак // Проблемы машиностроения. — 2012. — Т. 15, № 1. — С. 66—76.

Поступила в редакцию 28.02.2022.

УДК 631.116.2

С. Н. Бондарев

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 899 80 92,
seregabondarev1991@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ НА ПРОЦЕСС МАШИННОГО ДОЕНИЯ КОРОВЫ

Целью данной работы является теоретическое исследование по определению потребной мощности на процесс машинного доения в зависимости от конструктивных и технологических параметров доильного аппарата. Новизна работы заключается в получении аналитических выражений по определению потребной мощности на процесс машинного доения коровы с учетом ее молокоотдачи, а также конструктивных и технологических параметров доильной установки.

Введение содержит краткую информацию об анализе энергопотребления отрасли животноводства и, в частности, ферм для содержания крупного рогатого скота. В основной части работы проведено теоретическое исследование по определению потребной мощности на выдаивание молока из вымени коровы и его транспортировку в молокоприемник доильной установки с учетом ее конструктивных параметров.

Установлено, что потребная мощность на процесс машинного доения коровы $N_{д1} = 0,105$ кВт в двухтактном доильном аппарате и $N_{д2} = 0,1226$ кВт — в трех- и четырехтактном при $p_b = 40$ кПа, $\chi_{л} = 60$ мин⁻¹, соотношении тактов 60/40.

Результаты исследований будут полезны при разработке конструкций доильных аппаратов для выбора наиболее энергоэффективных параметров работы с учетом интенсивности молокоотдачи животного.

Ключевые слова: доильный аппарат; молоко; вакуумметрическое давление; сосковая резина; потребная мощность; молокоотдача; животноводство.

Рис. 2. Библиогр.: 4 назв.

S. N. Bondarev

Educational Institution “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Prospect,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (29) 899 80 92, seregabondarev1991@yandex.ru

DETERMINATION OF THE REQUIRED POWER FOR THE MACHINE COW MILKING PROCESS

The purpose of the work is theoretical research in determining the required power for the process of machine milking, depending on the design and technological parameters of the milking machine. The novelty of the work is in obtaining analytical expressions to determine the required power for the process of machine cow milking, taking into account its milk output, as well as the design and technological parameters of the milking unit.

The introduction contains brief information on the analysis of energy consumption of the livestock industry and, in particular, cattle farms. In the main part of the work, theoretical studies were carried out to determine the required capacity for milking milk from the udder of a cow and its transportation to the milking machine receiver, taking into account its design parameters.

It is established that the required power for the process of machine cow milking is $N_{д1} = 0.105$ kW in a two-stroke milking machine and $N_{д2} = 0.1226$ kW in a three-four-stroke at $p_b = 40$ kPa, $\chi_{л} = 60$ min⁻¹, the ratio of cycles 60/40.

The results of the research will be useful in the development of milking machine designs for selecting the most energy-efficient operation parameters, taking into account the intensity of the animal's milk output.

Key words: milking machine; milk; vacuum pressure; nipple rubber; required capacity; milk output; animal husbandry.
Fig. 2. Ref.: 4 titles.

Введение. Анализ энергопотребления по отраслям сельского хозяйства показывает, что отрасль животноводства является одним из основных потребителей энергии в сельском хозяйстве, на долю которого приходится 17...21 % общих энергозатрат, более 50 % от которых приходится на фермы для содержания крупного рогатого скота, где одним из основных потребителей энергии является процесс машинного доения [1].

Целью данной работы является теоретическое исследование по определению потребной мощности на процесс машинного доения от конструктивных и технологических параметров доильного аппарата.

Материалы и методы исследования. Машинное доение — технологический процесс, при котором выдаивание молока из сосков вымени коровы осуществляется в доильном аппарате с последующей транспортировкой молока в молокоприемник доильной установки за счет вакуумметрического давления, создаваемого вакуумным насосом. Тогда потребную мощность электродвигателя на привод вакуумного насоса в общем виде определим по формуле

$$N_{\text{д}} = N_{\text{выд}} + N_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{выд}}$ — потребная мощность на выдаивание молока из вымени коровы, кВт;

$N_{\text{тр}}$ — потребная мощность на транспортировку молока из доильного аппарата в молокоприемник доильной установки, кВт.

Потребную мощность на выдаивание молока из вымени коровы в общем виде определим по формуле

$$N_{\text{выд}} = \frac{Q_{\text{выд}} p_{\text{в}} n_{\text{д. а}}}{1000 \eta_{\text{н}}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{выд}}$ — объемная подача молока и воздуха, откачиваемая из доильного аппарата вакуумным насосом, м³/с;

$p_{\text{в}}$ — вакуумметрическое давление в доильной установке, Па;

$n_{\text{д. а}}$ — количество доильных аппаратов в доильной установке, шт.;

$\eta_{\text{н}}$ — коэффициент полезного действия вакуумного насоса.

Так как выдаивание молока из сосков вымени коровы происходит за счет разницы давлений в вымени и подсосковых камерах доильных стаканов, интенсивность потока молока, извлекаемого из соска вымени коровы, определим как для расхода жидкости через отверстие [2, с. 203]:

$$Q_{\text{м}} = \frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1}{4} \sqrt{\frac{2(p_{\text{в}} - p_{\text{вым}})}{\rho}}, \quad (3)$$

где $d_{\text{к}}$ — диаметр канала соска вымени коровы, м;

μ_1 — коэффициент расхода молока для канала соска вымени коровы;

$p_{\text{вым}}$ — величина внутривыменного давления животного, Па;

ρ — плотность молока, кг/м³.

Во время такта «сосание» в доильном аппарате происходит откачка воздуха вакуумным насосом из межстенных камер доильных стаканов с величины атмосферного давления до значения вакуумметрического. Тогда объем воздуха в межстенной камере доильного стакана при величине вакуумметрического давления определим с учетом его конструктивных параметров и величины прогиба стенок сосковой резины по формуле

$$V_{\text{м.к2}} = \frac{\pi}{4} (d_{\text{г}}^2 l_{\text{г}} - \delta_{\text{с.р}}^2 l_{\text{г}} - d_{\text{с}}^2 (l_{\text{с}} - l_{\text{пр}})) + \pi \delta_{\text{с.р}} d_{\text{в}} \left[(l_{\text{м.т}} + l_{\text{пр}} - l_{\text{с.р}}) + l_{\text{с}} + \frac{(l_{\text{с}}^3 - (l_{\text{м.т}} + l_{\text{пр}} - l_{\text{с.р}})^3)}{3(l_{\text{с.р}} - l_{\text{м.т}} - l_{\text{с}})^2} \right], \quad (4)$$

где $d_{\text{г}}$ — внутренний диаметр гильзы доильного стакана, м;

$l_{\text{г}}$ — длина гильзы доильного стакана, м;

$\delta_{\text{с.р}}$ — толщина стенки сосковой резины, м;

$d_{\text{с}}$ — диаметр соска вымени коровы, м;

$l_{\text{с}}$ — длина соска вымени животного, м;

$d_{\text{в}}$ — внутренний диаметр сосковой резины, м;

$l_{\text{м.т}}$ — длина молочной трубки, м;

$l_{\text{пр}}$ — длина присоска сосковой резины, м;

$l_{\text{с.р}}$ — длина сосковой резины, м.

Тогда объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом из межстенной камеры доильного стакана во время такта «сосание», определим с учетом формулы (4) и конструктивных параметров доильного стакана:

$$V_{\text{м.к1}} = \frac{\pi}{4} (d_{\text{г}}^2 l_{\text{г}} - \delta_{\text{с.р}}^2 l_{\text{г}} - d_{\text{с}}^2 (l_{\text{с}} - l_{\text{пр}}) - l_{\text{г}} (d_{\text{г}}^2 - d_{\text{н}}^2)) + \pi \delta_{\text{с.р}} d_{\text{в}} \times \left[(l_{\text{м.т}} + l_{\text{пр}} - l_{\text{с.р}}) - l_{\text{с}} - \frac{1}{3l_{\text{п.к}}^2} (l_{\text{с}}^3 - (l_{\text{м.т}} + l_{\text{пр}} - l_{\text{с.р}})^3) \right]. \quad (5)$$

Объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом из шланга, соединяющего вакуум-распределитель и межстенную камеру доильного стакана, определим как разницу объемов, занимаемых воздухом при вакуумметрическом и атмосферном давлениях:

$$V_{\text{шл.дс1}} = \frac{\pi d_{\text{шл.дс}}^2 l_{\text{шл.дс}}}{4} \left(\frac{p_{\text{атм}}}{(p_{\text{атм}} - p_{\text{в}})} - 1 \right), \quad (6)$$

где $d_{\text{шл.дс}}$ — внутренний диаметр шланга, соединяющего вакуум-распределитель и межстенную камеру доильного стакана, м;

$l_{\text{шл.дс}}$ — длина шланга, соединяющего вакуум-распределитель и межстенную камеру доильного стакана, м;

$p_{\text{атм}}$ — величина атмосферного давления, Па.

Для ускорения процесса транспортировки молока из молокосборной камеры коллектора доильного аппарата в молокопровод в корпусе коллектора выполнено калиброванное отверстие, соединяющее атмосферу с молокосборной камерой. Тогда объемный расход воздуха через отверстие в корпусе коллектора доильного аппарата определим по формуле

$$Q_{\text{к}} = \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}}}{4} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{p_{\text{атм}}}{\rho_0} \left[1 - \frac{\rho_0 (p_{\text{атм}} - p_{\text{в}})}{\rho_{\text{в}} p_{\text{атм}}} \right]}, \quad (7)$$

где $d_{\text{отв}}$ — диаметр отверстия в корпусе коллектора, м²;

$\mu_{\text{отв}}$ — коэффициент расхода воздуха через отверстие в корпусе коллектора;

k — показатель адиабаты для воздуха;

ρ_0 — плотность воздуха при атмосферном давлении, кг / м³;

$\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха при вакуумметрическом давлении в доильном аппарате, кг / м³.

Тогда с учетом формул (3), (5)...(7) объемную подачу молока и воздуха, откачиваемых из доильного аппарата вакуумным насосом, определим по формуле

$$Q_{\text{выд1}} = n_{\text{д.с}} \left[\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{\text{м.кл}} + V_{\text{шл.дс1}}}{t_{\text{А}}} \right] + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4}, \quad (8)$$

где $n_{\text{д.с}}$ — количество одновременно работающих доильных стаканов, шт.;

v_1 — скорость истечения молока через канал соска вымени коровы, м / с;

$v_{\text{в}}$ — скорость потока воздуха через отверстие в корпусе коллектора, м / с.

В трехтактном доильном аппарате во время такта «сосание» воздух откачивается из подсосковой и межстенной камер доильного стакана до величины вакуумметрического давления, после чего происходит извлечение молока из соска вымени животного и его транспортировка в коллектор доильного аппарата, откуда его транспортировка в молокопровод ускоряется поступлением воздуха через калиброванное отверстие в коллекторе. Тогда формула для определения объемной подачи молока и воздуха для трехтактного доильного аппарата примет следующий вид:

$$Q_{\text{выд2}} = n_{\text{д.с}} \left[\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{(V_{\text{м.кл}} + V_{\text{шл.дс1}} + V_{\text{п.кл}})}{t_{\text{А}}} \right] + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4}, \quad (9)$$

где $V_{\text{п.кл}}$ — объем воздуха, откачиваемый вакуумным насосом из подсосковой камеры доильного стакана, м³.

Затраты мощности на выдаивание молока в двухтактном доильном аппарате определим с учетом формулы (8):

$$N_{\text{выд1}} = \frac{p_{\text{в}} n_{\text{д.а}}}{1000 \eta_{\text{н}}} \left[n_{\text{д.с}} \left(\frac{\pi d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{\text{м.кл}} + V_{\text{шл.дс1}}}{t_{\text{А}}} \right) + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4} \right]. \quad (10)$$

Затраты мощности на выдаивание молока в трех- и четырехтактном доильных аппаратах определим с учетом выражения (9) по формуле

$$N_{\text{выд2}} = \frac{p_{\text{в}} n_{\text{д.а}}}{1000 \eta_{\text{н}}} \left[n_{\text{д.с}} \left(\frac{V_{\text{м.кл}} + V_{\text{шл.дс1}} + V_{\text{п.кл}}}{t_{\text{А}}} \right) + \frac{\pi d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{4} \right]. \quad (11)$$

При анализе формул (10) и (11) было установлено, что потребная мощность, затрачиваемая на выдаивание молока, зависит от величины вакуумметрического давления в доильном аппарате и его конструктивных параметров.

В процессе машинного доения коров в доильной установке выдоенное молоко с воздухом транспортируется из подсосковых камер доильных стаканов по молочным трубкам в коллектор доильного аппарата и далее по молочному шлангу в молокопровод, по которому транспортируется в молокоприемник доильной установки.

Тогда объем молоковоздушной смеси, поступающей в молокоприемник доильной установки в единицу времени, определим для двухтактного доильного аппарата с учетом формул (3) и (7):

$$Q_{\text{см1}} = \frac{\pi n_{\text{д.а}}}{4} \left(\frac{n_{\text{д.с}} d_{\text{к}}^2 \mu_1 t_{\text{в}} \chi_{\text{п}} v_1}{60} + d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}} \right), \quad (12)$$

где $t_{\text{в}}$ — продолжительность такта «сосание», с;

$\chi_{\text{п}}$ — частота пульсаций, мин⁻¹.

Так как в трех- и четырехтактных доильных аппаратах с выдоенным молоком также происходит и откачка воздуха из подсосковых камер доильных стаканов до величины вакуумметрического давления, то формула для определения объема молоковоздушной смеси, поступающей в молокоприемник доильной установки в единицу времени при трех- и четырехтактном доении, с учетом формул (3), (7) и (9) примет следующий вид:

$$Q_{см2} = \frac{\pi n_{д. а}}{4} \left(\frac{n_{д. с} \chi_{п}}{60} \left(d_k^2 \mu_1 t_B v_1 + d_B^2 (l_{с. п} - l_c - l_{м. т}) \left(\frac{p_{атм}}{(p_{атм} - p_B)} - 1 \right) \right) + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right). \quad (13)$$

При движении потока молока из подсосковых камер доильных стаканов в коллектор доильного аппарата возникают потери вакуумметрического давления, вызванные местными гидравлическими сопротивлениями. Тогда формулу для определения местных потерь вакуумметрического давления на гидравлические сопротивления при движении потока молока из подсосковых камер доильных стаканов в коллектор доильного аппарата определим как для потока жидкости при движении по трубопроводу [3, с. 128]:

$$\Delta p_{1-2}^м = \frac{\rho(v_1^2 - v_2^2)}{2}, \quad (14)$$

где v_2 — скорость потока молока на выходе из молочной трубки, м / с.

Скорость потока молока на выходе из молочной трубки определим как для потока жидкости при движении по трубопроводу [4, с. 117]:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_B - p_{вым})}{\rho(\alpha + \xi_{п. с} + \xi_{вых})}}, \quad (15)$$

где α — коэффициент Кориолиса;

$\xi_{п. с}$ — коэффициент местных сопротивлений, обуславливающий постепенное сужение диаметра сосковой резины в месте ее соединения с молочной трубкой;

$\xi_{вых}$ — коэффициент местных сопротивлений, обуславливающий выход потока молока из молочной трубки в коллектор.

С учетом формулы (15) выражение (14) примет следующий вид:

$$\Delta p_{1-2}^м = (p_B - p_{вым}) \left(1 - \frac{1}{(\alpha + \xi_{п. с} + \xi_{вых})} \right). \quad (16)$$

Потери давления по длине молочной трубки при движении потока молока из подсосковой камеры доильного стакана в коллектор доильного аппарата определим по формуле Дарси—Вейсбаха [4, с. 155]:

$$\Delta p_{1-2}^{дл} = \frac{\lambda_1 l_{м. т} v_2^2}{2 g d_{м. т}}, \quad (17)$$

где λ_1 — коэффициент гидравлических потерь на трение по длине молочной трубки;

$l_{м. т}$ — длина молочной трубки, м;

g — ускорение свободного падения, м / с²;

$d_{м. т}$ — внутренний диаметр молочной трубки, м.

Тогда суммарные потери вакуумметрического давления при движении потока молока из подсосковых камер доильных стаканов в коллектор доильного аппарата определим как сумму выражений (17) и (16) с учетом геометрических напоров:

$$\Delta p_{1-2} = (p_B - p_{\text{ВЫМ}}) \left(\frac{1}{(\alpha + \xi_{\text{п.с}} + \xi_{\text{ВЫХ}})} \left(\frac{0,316 l_{\text{м.т}}}{\sqrt[4]{\text{Re}} g d_{\text{м.т}} \rho} - 1 \right) + 1 \right) + (z_2 - z_1) g \rho, \quad (18)$$

где z_2 — высота расположения коллектора доильного аппарата, м;

z_1 — высота расположения доильных стаканов, м.

Из коллектора доильного аппарата молоко за счет вакуумметрического давления транспортируется по молочному шлангу в молокопровод доильной установки. Тогда формула для определения местных потерь вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси из коллектора в молокопровод примет следующий вид:

$$\Delta p_{2-3}^{\text{м}} = \frac{\rho_{\text{см}} (v_3^2 - v_4^2)}{2}, \quad (19)$$

где $\rho_{\text{см}}$ — плотность молоковоздушной смеси, кг / м³;

v_3 — скорость потока молоковоздушной смеси на входе в молочный шланг, м / с;

v_4 — скорость потока молоковоздушной смеси на входе в молокопровод, м / с.

Так как молоковоздушная смесь движется из коллектора в молокопровод за счет разности давлений, то скорость потока молоковоздушной смеси на входе в молочный шланг определим по формуле

$$v_3 = \sqrt{\frac{2(p_B - \Delta p_{1-2})}{\rho_{\text{см}}}}. \quad (20)$$

Молоко, транспортируемое в молокопровод, смешивается с воздухом, поступающим через калиброванное отверстие в корпусе коллектора. Тогда плотность молоковоздушной смеси определим с учетом формул (3) и (7):

$$\rho_{\text{см}} = \frac{n_{\text{д.с}} \rho d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1 + \rho_{\text{в}} d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}{n_{\text{д.с}} d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1 + d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}. \quad (21)$$

Подставив значения формулы (21) в выражение (20), получим формулу для определения скорости потока молоковоздушной смеси на входе в молочный шланг:

$$v_3 = \sqrt{\frac{2(p_B - \Delta p_{1-2}) (n_{\text{д.с}} \rho d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1 + \rho_{\text{в}} d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}})}{n_{\text{д.с}} d_{\text{к}}^2 \mu_1 v_1 + \rho_{\text{в}} d_{\text{отв}}^2 \mu_{\text{отв}} v_{\text{в}}}}. \quad (22)$$

Скорость потока молоковоздушной смеси на выходе из молочного шланга в молокопровод определим по формуле

$$v_4 = \varphi_2 v_3, \quad (23)$$

где φ_2 — коэффициент скорости потока молоковоздушной смеси при движении по молочному шлангу, определяемый по формуле

$$\varphi_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi_{\text{ВЫХ}}}}. \quad (24)$$

С учетом формул (18), (23) и (24) выражение (19) примет следующий вид:

$$\Delta p_{2-3}^M = (p_B - \Delta p_{1-2}) \left(1 - \frac{1}{(\alpha + \xi_{\text{ВЫХ}})} \right). \quad (25)$$

Потери давления по длине молочного шланга при движении потока молоковоздушной смеси из коллектора в молокопровод определим по формуле

$$\Delta p_{2-3}^{\text{дл}} = \frac{\lambda_2 l_{\text{м. шл}} v_3^2}{2g d_{\text{м. шл}}}, \quad (26)$$

где λ_2 — коэффициент потерь на трение по длине молочного шланга;

$l_{\text{м. шл}}$ — длина молочного шланга, м.

$d_{\text{м. шл}}$ — диаметр молочного шланга доильной установки, м.

Суммарные потери вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси из коллектора в молокопровод определим с учетом выражений (26), (22), (25) и геометрических напоров:

$$\Delta p_{2-3} = (p_B - \Delta p_{1-2}) \left(1 - \frac{1}{(\alpha + \xi_{\text{ВЫХ}})} \right) + \frac{0,316 \Delta p_{1-2} l_{\text{м. шл}}}{\rho_{\text{см}} g d_{\text{м. шл}} \sqrt[4]{\text{Re}_2}} + (z_3 - z_2) g \rho_{\text{см}}, \quad (27)$$

где Re_2 — число Рейнольдса для потока молока при движении по молочному шлангу доильного аппарата;

z_3 — высота расположения молокопровода, м;

z_2 — высота расположения коллектора, м.

Так как транспортировка молоковоздушной смеси в молокоприемник осуществляется по молокопроводу, то потери вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси в молокоприемник доильной установки определим как потери по длине молокопровода:

$$\Delta p_{3-4} = \frac{\lambda_3 l_{\text{м. пр}} v_5^2}{2g d_{\text{м. пр}}}, \quad (28)$$

где λ_3 — коэффициент потерь на трение по длине молокопровода;

$l_{\text{м. пр}}$ — длина молокопровода, м;

v_5 — скорость потока молоковоздушной смеси в молокопроводе, м / с;

$d_{\text{м. пр}}$ — диаметр молокопровода, м.

Скорость потока молоковоздушной смеси в молокопроводе определим как для потока жидкости при движении по трубопроводу за счет разности давлений:

$$v_5 = \sqrt{\frac{2(p_B - \Delta p_{2-3})}{\rho_{\text{см}} (\alpha + \xi_{\text{ВЫХ}} + \xi_{\text{ПОВ}})}}. \quad (29)$$

Суммарные потери вакуумметрического давления при движении потока молоковоздушной смеси из подсосковых камер доильного стакана в молокоприемник доильной установки определим как сумму выражений (27), (28) и (18):

$$\Delta p_B = n_{д.а} \left[\frac{0,316 l_{м.т} (p_B - p_{вым})}{\sqrt[4]{Re} g d_{м.т} \rho (\alpha + \xi_{п.с} + \xi_{вых})} + \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_2 l_{м.шл} v_3^2}{g d_{м.шл}} + \rho (v_1^2 - v_2^2) + \rho_{см} (v_3^2 - v_4^2) + \right. \right. \\ \left. \left. + g (\rho_{см} (z_3 - z_2) + \rho (z_2 - z_1)) \right) \right] + \frac{0,316 l_{м.пр} (p_B - \Delta p_{2-3})}{\rho_{см} g d_{м.пр} (\alpha + \xi_{вых} + \xi_{пов}) \sqrt[4]{Re_3}}. \quad (30)$$

Тогда затраты мощности вакуумного насоса на транспортировку молока из подсосковых камер доильных стаканов в молокоприемник доильной установки при двухтактном доении определим с учетом формул (30) и (12):

$$N_{тр1} = \frac{\pi n_{д.а} (n_{д.а} (\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3}) + 2 \Delta p_{3-4})}{4000 \eta_H} \left(\frac{n_{д.с} d_K^2 \mu_1 t_B \chi_{п} v_1}{60} + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right). \quad (31)$$

Затраты мощности на транспортировку молока из подсосковых камер доильных стаканов в молокоприемник доильной установки при трех- и четырехтактном доении определим с учетом выражений (30) и (13):

$$N_{тр2} = \frac{\pi n_{д.а} (n_{д.а} (\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3}) + 2 \Delta p_{3-4})}{4000 \eta_H} \times \\ \times \left(\frac{n_{д.с} \chi_{п}}{60} \left(d_K^2 \mu_1 t_B v_1 + d_B^2 (l_{с.р} - l_c - l_{м.т}) \left(\frac{p_{атм}}{(p_{атм} - p_B)} - 1 \right) \right) + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right). \quad (32)$$

Анализ формул (31) и (32) показал, что потребная мощность на транспортировку молока из подсосковых камер доильных стаканов в молокоприемник доильной установки зависит от конструкции доильной установки, величины вакуумметрического давления, высоты расположения молокопровода относительно доильной площадки, частоты пульсаций и конструкции вакуумного насоса.

Результаты исследования и их обсуждение. Подставив значения формул (31), (2) и (10) в выражение (1), после математических преобразований получим формулу для определения потребной мощности на процесс машинного доения коровы двухтактным доильным аппаратом:

$$N_{д1} = \frac{n_{д.а}}{1000 \eta_H} \left[p_B \left[n_{д.с} \left(\frac{\pi d_K^2 \mu_1 v_1}{4} + \frac{V_{м.к1} + V_{шл.дс1}}{t_A} \right) + \frac{\pi d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B}{4} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\pi (n_{д.а} (\Delta p_{1-2} + \Delta p_{2-3}) + 2 \Delta p_{3-4})}{4} \left(\frac{n_{д.с} d_K^2 \mu_1 t_B \chi_{п} v_1}{60} + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right) \right]. \quad (33)$$

Для трех- и четырехтактного доильных аппаратов формула по определению потребной мощности на процесс машинного доения коровы с учетом выражений (31), (2) и (11) примет следующий вид:

$$N_{д2} = \frac{n_{д.а}}{1000 \eta_H} \left[p_B \left[n_{д.с} \left(\frac{V_{м.к1} + V_{шл.дс1} + V_{п.к1}}{t_A} \right) + \frac{\pi d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B}{4} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\pi \Delta p_B}{4} \left(\frac{n_{д.с} \chi_{п}}{60} \left(d_K^2 \mu_1 t_B v_1 + d_B^2 (l_{с.р} - l_c - l_{м.т}) \left(\frac{p_{атм}}{(p_{атм} - p_B)} - 1 \right) \right) + d_{отв}^2 \mu_{отв} v_B \right) \right]. \quad (34)$$

Подставив численные значения конструктивных и технологических параметров доильной установки в формулы (33) и (34), получим графические зависимости потребной мощности на процесс машинного доения коровы от величины вакуумметрического давления в доильном аппарате (рисунки 1, 2).

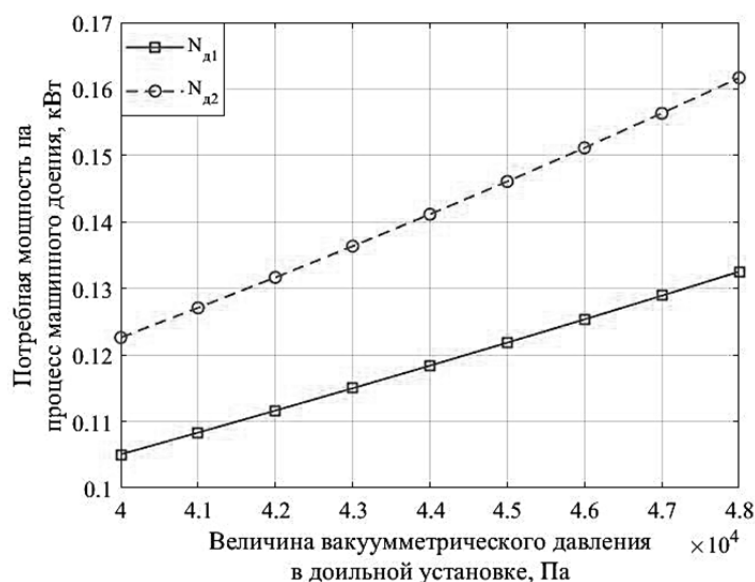


Рисунок 1. — Зависимость потребной мощности на процесс машинного доения коровы от величины вакуумметрического давления в доильном аппарате при $\chi_{п} = 60 \text{ мин}^{-1}$ и соотношении тактов 60/40

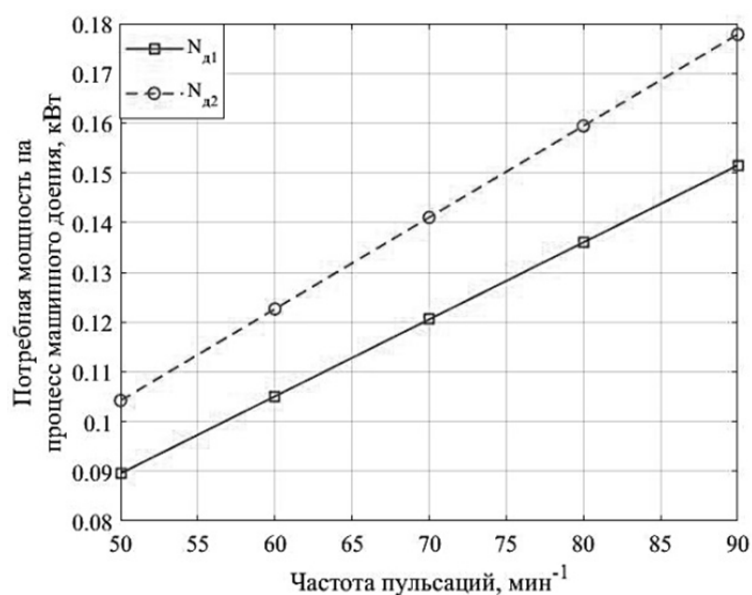


Рисунок 2. — Зависимость потребной мощности на процесс машинного доения коровы от частоты пульсаций в доильном аппарате при $p_v = 40 \text{ кПа}$ и соотношении тактов 60/40

Заключение. При анализе графических зависимостей, представленных на рисунках 1 и 2, было установлено, что потребная мощность на процесс машинного доения коровы находится в пределах 0,09...0,18 кВт на один доильный аппарат. Увеличение потребной мощности на процесс машинного доения коровы с повышением величины вакуумметрического давления и частоты пульсаций происходит из-за увеличения расхода воздуха в доильном аппарате.

Установлено, что потребная мощность на процесс машинного доения коровы $N_{д1} = 0,105$ кВт в двухтактном доильном аппарате и $N_{д2} = 0,1226$ кВт — в трех- и четырехтактном при $p_v = 40$ кПа, $\chi_n = 60 \text{ мин}^{-1}$, соотношении тактов 60/40.

Список цитированных источников

1. Мишуров, Н. П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока / Н. П. Мишуров. — М. : Росинформагротех, 2010. — 152 с.
2. Калекин, А. А. Гидравлика и гидравлические машины : учеб. пособие для студентов вузов / А. А. Калекин. — М. : Мир, 2005. — 512 с.
3. Зезин, В. Г. Механика жидкости и газа : учеб. пособие / В. Г. Зезин. — Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2016. — 250 с.
4. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : учеб. для машиностр. вузов / Т. М. Башта [и др.]. — М. : Альянс, 2010. — 423 с.

Поступила в редакцию 22.03.2022.

УДК 631.363.2:636.085

А. В. Китун¹, доктор технических наук, профессор,
В. И. Передня², доктор технических наук, профессор,
П. Ю. Крупенин³, кандидат технических наук, доцент,
В. Г. Филатов⁴, **И. В. Дубень**⁵, кандидат технических наук, доцент

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by

² Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь

³ Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5,
213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com

⁴ Открытое акционерное общество «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш»,
ул. Шинная, 5, 213822 Бобруйск, Республика Беларусь, delo@agromash.by

⁵ Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КОРМОВ ПЛОСКОСТНЫМ РОТОРНЫМ ИЗМЕЛЬЧАЮЩИМ АППАРАТОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

В статье изложены результаты теоретических исследований процесса измельчения кормов в вертикальном потоке. Разработана математическая модель траектории движения частицы корма в рабочей камере плоскостного роторного измельчающего аппарата. Определены факторы, влияющие на вероятность разрушения частицы при ее встрече с ножом и противорежущим элементом, и установлена их связь с конструктивными параметрами измельчающего аппарата.

Приводятся результаты экспериментальных исследований процесса измельчения зеленой массы. Экспериментальным путем изучено влияние количества ножей плоскостного роторного измельчающего аппарата на гранулометрический состав корма. Предложена усовершенствованная конструкция измельчающего аппарата, предполагающая закрепление на одной державке двух симметричных ножей, что увеличит на 50 % вероятность встречи частиц корма с режущими элементами. Предлагаемая конструкция ротора плоскостного измельчающего аппарата позволяет повысить степень измельчения корма без изменения параметров рабочей камеры или противорежущих элементов.

Ключевые слова: роторный измельчающий аппарат; измельчение; математическая модель; зеленая масса; нож; противоререз.

Рис. 4. Библиогр.: 6 назв.

A. V. Kitun¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
V. I. Perednya², DSc in Technical Sciences, Professor,
P. Y. Krupenin³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. G. Filatov⁴, **I. V. Duben**⁵, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹ Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", 99 Nezavisimosti Prospekt,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

² Republican Unitary Enterprise "The Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on agricultural mechanization", 1 Knorina Str., 220049 Minsk, the Republic of Belarus

³ Educational Institution "Belarusian State of the Orders of October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", 5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

⁴ JSC "Management Company of the "Bobruiskagromash Holding", 5 Shinnaya Str., 213822 Bobruisk, the Republic of Belarus, delo@agromash.by

⁵ Educational Institution "Baranovich State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranovich, the Republic of Belarus

RESEARCH OF GRINDING FEED PROCESS BY A PLANAR VERTICAL ROTARY GRINDER

The article presents the results of theoretical studies of the process of crushing feed in a vertical stream. A mathematical model of the trajectory of the feed particle in the working chamber of a planar rotary shredder has been developed. The factors influencing the probability of destruction of a particle when it encounters a knife and an anti-cutting element are determined, and their connection with the design parameters of the shredding apparatus is established.

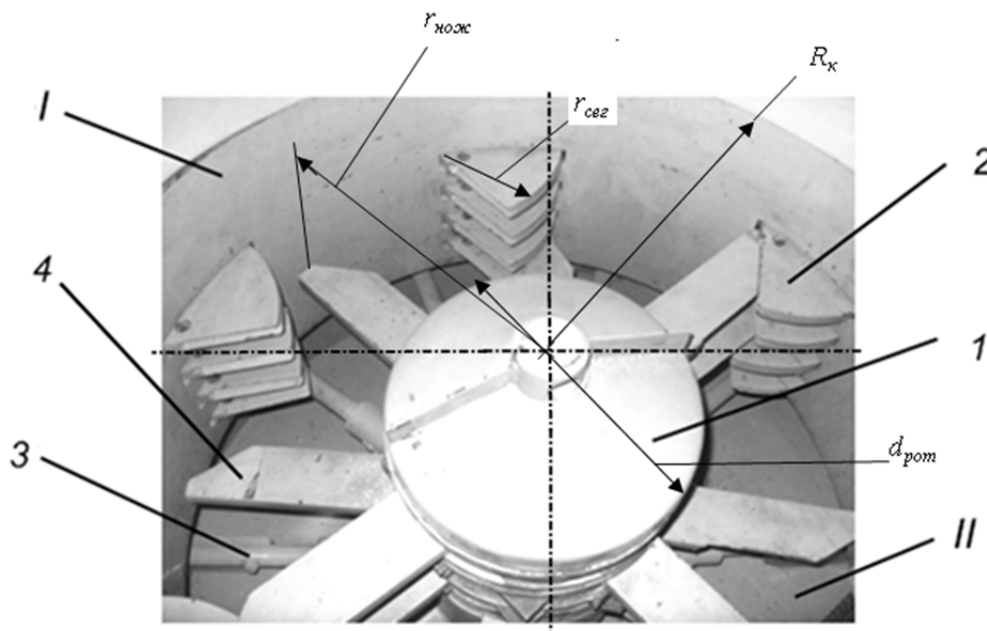
The results of experimental studies of the process of green mass grinding are presented. The effect of the number of knives of a planar rotary shredder on the granulometric composition of the feed was studied experimentally. An improved design of the shredding apparatus which involves fixing two symmetrical knives on one holder is proposed. It will increase the probability of meeting feed particles with cutting elements by 50 %. The proposed design of the rotor of a planar shredding device allows to increase the degree of feed crushing without changing the parameters of the working chamber or anti-cutting elements.

Key words: rotary grinder; grinding; mathematical model; green feed; knife; countercut.

Fig. 4. Ref.: 6 titles.

Введение. Работы по теоретическому изучению влияния отдельных параметров режущих аппаратов на степень измельчения кормов проводились многими учеными [1; 2]. Исследования были направлены на изучение влияния числа режущих пар на среднюю длину резки. Полученные результаты констатируют уменьшение средней длины резки стебельчатых кормов с увеличением числа противорежущих элементов. Однако, как отмечают сами авторы, полученные результаты теоретических исследований не в полной мере согласуются с экспериментальными данными. Это свидетельствует о том, что физические процессы, протекающие в измельчителях, изучены недостаточно и требуют поиска новых решений, в том числе и для измельчителей с вертикально установленной рабочей камерой.

Материалы и методы исследования. В измельчителе с вертикально расположенной рабочей камерой и многоплоскостным измельчающим аппаратом корм с момента его подачи в рабочую зону под действием силы тяжести движется в сторону выгрузного окна. В ходе этого движения корм проходит через рабочую зону вращающихся лезвий ножей 4 (рисунок 1) и неподвижно установленных противорежущих элементов 2, образующих между собой режущие пары. В результате взаимодействия режущих элементов с кормом траектория движения частиц последнего через рабочую камеру представляет собой винтовую линию.



I — камера измельчения и смешивания; II — выгрузная камера;
1 — ротор; 2 — блок противорежущих элементов; 3 — швырляка; 4 — нож

Рисунок 1. — Плоскостной роторный измельчающий аппарат вертикального типа

Таким образом, в период выполнения рабочего процесса корм, попадая в рабочую зону противорежущих элементов и ножей, измельчается и смешивается в непрерывном потоке. При этом частицы корма совершают два вида движения:

- прямолинейное движение вдоль режущей кромки противорежущего элемента в момент резания;
- вне рабочей зоны ножей и противорежущих элементов корм под действием силы тяжести перемещается по винтовой линии в сторону выгрузной камеры.

Результаты исследования и их обсуждение. Исходя из изложенных предпосылок и физического процесса работы измельчающего устройства, размер измельченных частиц корма можно определить по формуле

$$l_{\text{изм}} = l_{\text{нач}} P_{\text{изм}}, \quad (1)$$

где $l_{\text{нач}}$ — исходный размер частиц корма, м;
 $P_{\text{изм}}$ — вероятность измельчения частиц корма.

Вероятность измельчения частицы корма можно определить по зависимости [3]

$$P_{\text{изм}} = 1 - e^{-\mu_{\text{изм}} t_{\text{ч}}}, \quad (2)$$

где $\mu_{\text{изм}}$ — параметр процесса измельчения;
 $t_{\text{ч}}$ — время нахождения частицы в рабочей зоне измельчения, с.

Параметр процесса $\mu_{\text{изм}}$, представляющий собой интенсивность измельчения, определяется конструктивно-кинематическими параметрами устройства, которые обеспечивают соответствующие вероятности встречи частицы с ножом и последующего разрушения (резания). В общем виде интенсивность измельчения определяется произведением

$$\mu_{\text{изм}} = q_1 q_2,$$

где q_1 — вероятность встречи частицы корма с ножом;
 q_2 — вероятность разрушения частицы корма при встрече с ножом.

Поскольку частицы корма в рабочей камере сориентированы в пространстве случайным образом, то вероятность их встречи с активными рабочими органами измельчителя определяется по формуле [4]

$$q_1 = \frac{2 \arctg(l_{\text{нож}} / a)}{\pi},$$

где $l_{\text{нож}}$ — длина проекции режущей кромки ножа на плоскость противорежущей пластины, м;
 a — расстояние между режущими кромками смежных ножей, м.

Длина проекции режущей кромки ножа на плоскость противорежущей пластины может быть рассчитана по зависимости

$$l_{\text{нож}} = r_{\text{сер}} \cos \alpha_{\text{сер}} - \Delta, \quad (3)$$

где $r_{\text{сер}}$ — длина активной части противорежущего элемента, м;
 $\alpha_{\text{сер}}$ — угол наклона противорежущего элемента ко внутренней поверхности рабочей камеры, рад;
 Δ — зазор между торцом ножа и внутренней поверхностью рабочей камеры, м.

С учетом формулы (3) вероятность встречи частицы корма с ножом запишется в следующем виде:

$$q_1 = \frac{2 \arctg \left[(r_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} - \Delta) / a \right]}{\pi}.$$

Вероятность разрушения частиц корма определяется по формуле

$$q_2 = 1 - \frac{v_{\text{кор}}}{v_{\text{нож}}}, \quad (4)$$

где $v_{\text{кор}}$ — скорость перемещения корма внутри рабочей камеры, м / с;

$v_{\text{нож}}$ — окружная скорость ножа, м / с.

Скорость перемещения корма внутри рабочей камеры в общем виде можно определить по формуле

$$v_{\text{кор}} = \frac{Q}{S_{\text{кам}} \rho},$$

где Q — производительность измельчителя, кг / с;

$S_{\text{кам}}$ — площадь поперечного сечения рабочей камеры, м²;

ρ — плотность корма в рабочей камере, кг / м³.

Площадь поперечного сечения рабочей камеры зависит как от ее диаметра, так и от геометрических параметров ножевого ротора и противорежущих элементов:

$$S_{\text{кам}} = \left[\frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}}, \quad (5)$$

где $D_{\text{кам}}$ — диаметр рабочей камеры, м;

$d_{\text{рот}}$ — диаметр ротора измельчителя, м;

$l_{\text{нож}}, b_{\text{нож}}, z_{\text{нож}}$ — длина (м), ширина (м) и количество ножей;

$z_{\text{сег}}$ — количество противорезов в ярусе;

$z_{\text{яр}}$ — количество ярусов ножей и противорежущих пластин в рабочей камере.

Поставив в выражение (4) площадь поперечного сечения рабочей камеры из формулы (5), определим скорость перемещения корма внутри рабочей камеры:

$$v_{\text{кор}} = \frac{Q}{\left[\frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}} \rho}.$$

Поскольку в вертикально расположенной рабочей камере многоплоскостного измельчающего аппарата корм перемещается в сторону выгрузной камеры по винтовой линии, полная скорость перемещения корма

$$v_{\text{ч. кор}} = v_{\text{кор}} \cos \alpha_{\text{кор}} = \frac{Q \cos \alpha_{\text{кор}}}{\left[\frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}} \rho}, \quad (6)$$

где $\alpha_{\text{кор}}$ — угол наклона траектории движения корма по внутренней поверхности рабочей камеры, рад.

Выразив окружную скорость ножей как $v_{\text{нож}} = \omega r_{\text{нож}}$, где ω — угловая скорость ротора, рад / с; $r_{\text{нож}}$ — радиус ножа, м, и подставив в формулу (4) значения составляющих, получим зависимость, определяющую вероятность разрушения частиц корма:

$$q_2 = 1 - \frac{Q \cos \alpha_{\text{кор}}}{\left[\frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}} \rho \omega r_{\text{нож}}}.$$

Интенсивность измельчения $\mu_{\text{изм}}$ с учетом формулы (6) запишется в следующем виде:

$$\mu_{\text{изм}} = \frac{2 \arctg \left[(r_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} - \Delta) / a \right]}{\pi} \times \left[1 - \frac{Q \cos \alpha_{\text{кор}}}{\left[\frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}} \rho \omega r_{\text{нож}}} \right]. \quad (7)$$

Из формулы (2) следует, что вероятность измельчения частицы корма зависит от времени $t_{\text{ч}}$ ее нахождения в рабочей камере, определяемого формулой

$$t_{\text{ч}} = t_{\text{р}} + t_{\text{пр}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{р}}$ — время перемещения частицы корма по внутренней поверхности рабочей камеры, с;
 $t_{\text{пр}}$ — время перемещения частицы корма по поверхности противорежущих элементов, с.
 Время $t_{\text{р}}$ можно определить по формуле

$$t_{\text{р}} = \frac{l_{\text{р}}}{v_{\text{ч. кор}}},$$

где $l_{\text{р}}$ — расстояние, преодолеваемое частицей в ходе движения внутри рабочей камеры, м.
 Расстояние $l_{\text{р}}$ определим по формуле

$$l_{\text{р}} = 2\pi R_{\text{к}}, \quad (9)$$

где $R_{\text{к}}$ — радиус рабочей камеры, м.

С учетом формул (6) и (9) время $t_{\text{р}}$ перемещения частицы корма по внутренней поверхности рабочей камеры запишется в виде

$$t_{\text{р}} = \frac{2\pi R_{\text{к}} \left[\frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яр}} \rho}{Q \cos \alpha_{\text{кор}}}. \quad (10)$$

Время $t_{\text{пр}}$ перемещения частицы корма по поверхности противорежущих элементов определяется отношением

$$t_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{пр}}}{v_{\text{пр}}},$$

где $l_{\text{пр}}$ — расстояние, проходимое частицей корма по рабочей части противореза, м;
 $v_{\text{пр}}$ — скорость перемещения частицы корма по рабочей части противореза, м / с.

Расстояние $l_{\text{пр}}$ выразим формулой

$$l_{\text{пр}} = r_{\text{сег}} z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}}. \quad (11)$$

С учетом формулы (11) время $t_{\text{пр}}$ перемещения частицы корма по поверхности противорежущих элементов запишется в виде

$$t_{\text{пр}} = \frac{r_{\text{сег}} z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}}}{v_{\text{пр}}}. \quad (12)$$

Подставив в выражение (8) значения слагаемых из формул (10) и (12), получим отношение

$$t_{\text{ч}} = \frac{2\pi R_{\text{к}} \left[\frac{\pi}{4} (D_{\text{кам}}^2 - d_{\text{рот}}^2) - l_{\text{нож}} b_{\text{нож}} z_{\text{нож}} - \pi r_{\text{сег}}^2 z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}} \right] z_{\text{яп}} \rho}{Q \cos \alpha_{\text{кор}}} + \frac{r_{\text{сег}} z_{\text{сег}} \cos \alpha_{\text{сег}}}{v_{\text{пр}}}. \quad (13)$$

Подстановка значений интенсивности измельчения $\mu_{\text{изм}}$ и времени нахождения частицы корма в рабочей камере $t_{\text{ч}}$, определяемых по формулам (7) и (13), в выражение (2) позволит определить вероятность измельчения частицы $P_{\text{и}}$, зная которую, можно по формуле (1) рассчитать размер $l_{\text{изм}}$ частиц корма на выходе из плоскостного роторного измельчающего аппарата вертикального типа.

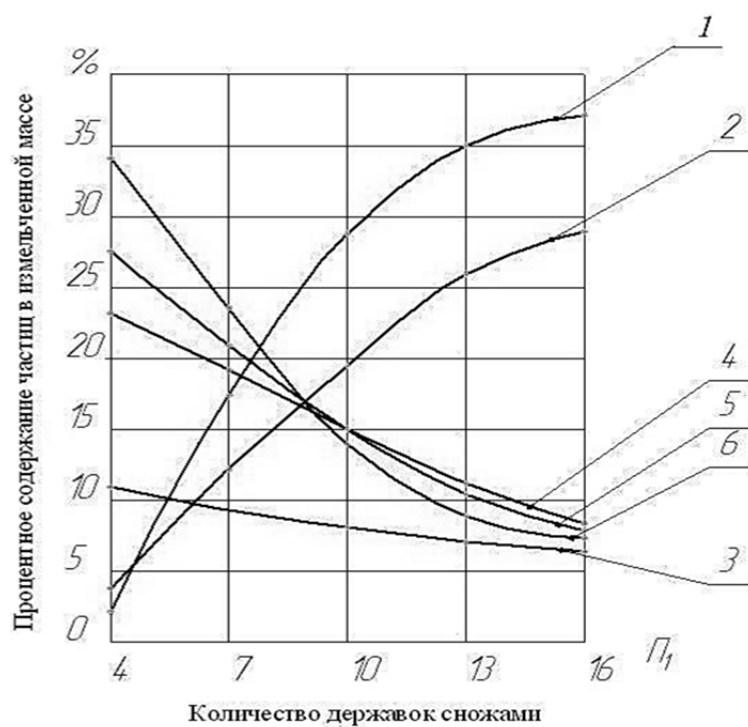
Анализ полученной математической модели показывает, что вероятность измельчения частицы корма возрастает при увеличении длины ножей и противорежущих элементов. Конструктивно это выполнить сложно, так как в этом случае увеличивается диаметр рабочей камеры измельчителя. Более простым путем является увеличение количества закрепленных на роторе ножей или установленных по внутреннему периметру рабочей камеры противорежущих элементов.

Изучив характер влияния составляющих математической модели, принято решение увеличить вероятность измельчения частиц $P_{\text{изм}}$ за счет изменения числа режущих элементов. Для проверки выдвинутой гипотезы изготовлен плоскостной роторный измельчающий аппарат вертикального типа с конструкцией ротора, позволяющей варьировать количество его ножей в пределах от 4 до 16 шт.

Проведенные экспериментальные исследования измельчения зеленой массы показали, что с увеличением количества ножей в рабочей камере измельчителя доля мелкой фракции частиц увеличивается (рисунок 2). В этом случае частицы корма чаще попадают в рабочую зону режущих элементов. Данная зависимость прослеживается и в исследованиях рабочего процесса измельчителя-смесителя ИС-20 [5].

Однако с увеличением числа режущих элементов появляются и негативные факторы. Из графической зависимости на рисунке 3 видно, что по мере увеличения количества державок с ножами производительность измельчителя снижается. Это вызвано тем, что опорные пластины перекрывают свободный просвет рабочей камеры.

Вторым отрицательным моментом является рост удельной энергоемкости процесса измельчения, объясняемый тем, что с увеличением числа державок с ножами уменьшается пространство между ними, возрастает переносная скорость массы и время пребывания частиц в рабочей зоне ножей и противорежущих элементов.



1 — фракция частиц размером менее 5 мм; 2 — 5...10 мм; 3 — 10...15 мм; 4 — 15...20 мм; 5 — 20...30 мм; 6 — более 30 мм

Рисунок 2. — Зависимость размеров частиц зеленой массы от числа установленных на роторе измельчителя ножей

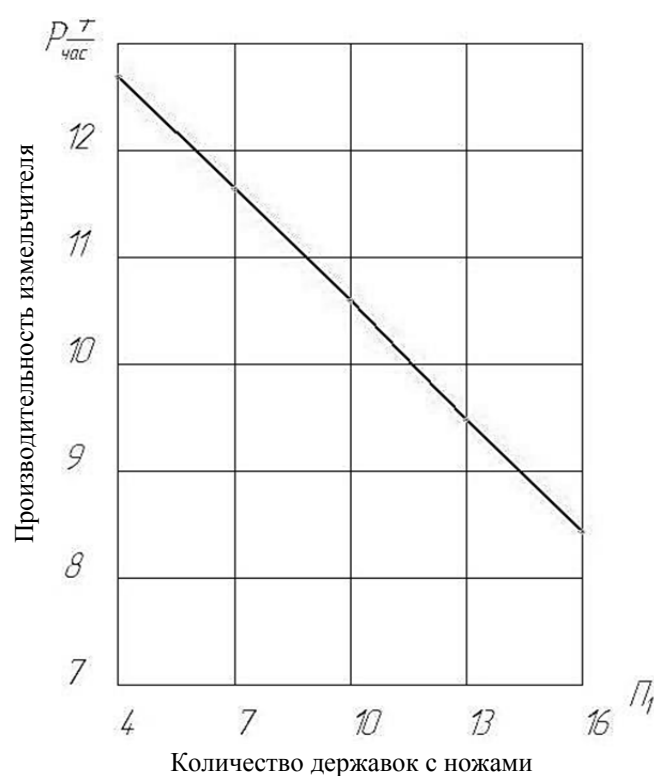


Рисунок 3. — Зависимость производительности измельчителя от количества установленных на роторе ножей



1 — державка; 2 — верхний нож; 3 — нижний нож;
4 — противорежущий элемент

Рисунок 4. — Рабочий орган измельчителя кормов

Вместе с тем полученные результаты позволили начать поиск рациональной конструкции рабочего органа. В результате предложена более простая и пригодная для измельчения кормов конструкция рабочего органа (рисунок 4).

Рабочий орган содержит два параллельных режущих ножа, закрепленных на одной державке, а следовательно, число воздействий на частицу увеличено вдвое. Данная конструкция позволила увеличить на 50 % вероятность встречи частиц корма с режущим элементом. Новизна конструкции ножа защищена патентом [6].

Заключение. Вероятность измельчения частицы корма возрастает при увеличении числа закрепленных на роторе ножей или установленных по внутреннему периметру рабочей камеры противорежущих элементов. Однако с увеличением числа ножей по периметру рабочей камеры уменьшается производительность измельчителя. Это вызвано тем, что дополнительные ножи перекрывают просвет рабочей камеры. С увеличением числа ножей уменьшается пространство между ними, возрастает переносная скорость массы и время пребывания частиц в рабочей зоне ножей и противорежущих элементов, как следствие, возрастает удельная энергоемкость выполняемого процесса.

В целях минимизации негативных эффектов при увеличении количества ножей ротора предложен рабочий орган, содержащий два параллельных режущих ножа, закрепленных на одной державке, что увеличивает на 50 % вероятность встречи частиц корма с режущим элементом плоскостного роторного измельчающего аппарата.

Список цитированных источников

1. Надежин, А. В. К обоснованию геометрических параметров измельчителей стебельчатых кормов / А. В. Надежин // Совершенствование технологий и технических средств в животноводстве : сб. науч. тр. — Зерноград, 1988. — 140 с.
2. Овчинников, А. А. К вопросу обоснования конструктивно-режимных параметров измельчителя-смесителя непрерывного действия / А. А. Овчинников, Е. В. Сурменев, А. В. Влазнев // Механизация заготовки, приготовления и раздачи кормов : сб. науч. тр. — Саратов, 1982. — С. 74—82.
3. Передня, В. И. Определение параметров универсального измельчителя кормов / В. И. Передня, В. Романюк, А. В. Китун // Problemy intensyfikacji produkcji zwierzecej z uwzględnieniem ochrony środowiska i prze-

pisow UE : VII Miedzynarodowa Konferencja Naukowa, Warszawa, 23—48 września 2001 r. / Institut Budownictwa, Mechanizacji Rolnictwa ; red. E. Bieñ [i dr.]. — Warszawa. — 2001. — P. 391—398.

4. *Передня, В. И.* Механизация приготовления полноценных кормосмесей в поточных линиях для эффективного использования кормов на скотоводческих фермах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / В. И. Передня. — Минск, 1984. — 320 л.

5. *Голиков, В. А.* Рабочий орган для измельчения грубых кормов повышенной влажности / В. А. Голиков // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. — 1978. — № 11. — С. 17—19.

6. Рабочий орган измельчителя кормов : пат. 1523 Респ. Беларусь : МПК7 А 01 F 29/00 / А. В. Китун, В. И. Передня ; заявитель Белорус. гос. аграрный ун-т. № u 20040022 ; дата публ.: 30.09.04 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. — 2004. — № 3. — С. 144.

Поступила в редакцию 18.02.2022.

УДК 005.591.1:637.116

А. В. Китун¹, доктор технических наук, профессор,
В. И. Передня², доктор технических наук, профессор,
П. Ю. Крупенин³, кандидат технических наук, доцент,
В. Г. Филатов⁴, **И. В. Дубень**⁵, кандидат технических наук, доцент

¹Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by

²Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси
по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь

³Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com

⁴Открытое акционерное общество «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш»,
ул. Шинная, 5, 213822 Бобруйск, Республика Беларусь, delo@agromash.by

⁵Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ЛИНИИ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ МОЛОКА

Снижение затрат труда на единицу продукции животноводства немыслимо без рационального использования оборудования для механизации процессов первичной обработки молока на животноводческом предприятии при одновременном обеспечении оптимального управления производством, повышении качества и снижении себестоимости выпускаемой продукции. Эти требования могут быть успешно выполнены при соответствующем совершенствовании производственных процессов в ходе их развития путем более полной замены труда человека машинным трудом.

Первичная обработка молока включает в себя следующие технологические операции: очистка молока от механических примесей, охлаждение, хранение, а в отдельных случаях еще сепарирование и пастеризация. В статье описана методика технологических расчетов линии первичной обработки молока на ферме. Рассмотрена взаимосвязь производительности линии первичной обработки молока с конструктивными параметрами такого оборудования, как центробежный очиститель молока, сепаратор и пастеризатор.

Ключевые слова: очистка молока; охлаждение молока; центробежный очиститель; сепаратор; пастеризатор; теплообменный аппарат.

Рис. 1. Библиогр.: 6 назв.

A. V. Kitun¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
V. I. Perednya², DSc in Technical Sciences, Professor,
P. Y. Krupenin³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. G. Filatov⁴, **I. V. Duben**⁵, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", 99 Nezavisimosti Prospect,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

²Republican Unitary Enterprise "The Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences
of Belarus on agricultural mechanization", 1 Knorina Str., 220049 Minsk, the Republic of Belarus

³Educational Institution "Belarusian State of the Orders of October Revolution and Labor Red Banner
Agricultural Academy", 5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

⁴JSC "Management Company of the "Bobruiskagromash Holding", 5 Shinnaya Str., 213822 Bobruisk,
the Republic of Belarus, delo@agromash.by

⁵Educational Institution "Baranovich State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranovich, the Republic of Belarus

OPTIMIZATION OF THE EQUIPMENT CHOICE FOR A PRIMARY MILK PROCESSING LINE

Reducing labor costs per unit of livestock production is unthinkable without the rational use of equipment for the mechanization of the primary processing of milk at a livestock enterprise, while ensuring optimal production management, improving the quality and reducing the cost of products. These requirements can be successfully done

with the appropriate improvement of production processes during their development by more complete replacement of human labor by machine.

The primary processing of milk includes the following technological operations: cleaning milk, cooling, storage, and in some cases also separation and pasteurization. The article describes the method of technological calculations of the primary milk processing line on the farm. The relationship between the capacity of the milk primary processing line and the design parameters of such equipment as a centrifugal milk purifier, separator and pasteurizer is considered.

Key words: milk purification; milk cooling; centrifugal cleaner; separator; pasteurizer; heat exchanger.

Fig. 1. Ref.: 6 titles.

Введение. Предприятия животноводческого комплекса представляют собой сложную систему, состоящую из совокупности взаимосвязанных элементов — логистических звеньев, между которыми установлены функциональные связи и отношения. До недавнего времени производители животноводческой продукции не придавали серьезного значения созданию специальных систем, позволяющих оптимизировать управление материальными потоками на предприятии. Системы распределения, как правило, не планировались, а система управления процессами товародвижения была слабой [1].

В связи с этим разработка стратегического и тактического планирования технологических процессов на животноводческом предприятии должна сочетать в себе использование современных форм организации производства и требований эффективного контроля за движением производственных потоков [2].

Материалы и методы исследования. Получение в условиях хозяйств молока наивысшего сорта является одним из наиболее важных условий роста рентабельности его производства. Отсюда понятно, насколько важна первичная обработка и охлаждение молока в условиях хозяйств [3].

В основу работы по организации поточной механизированной технологии должны быть положены оптимальные варианты перспективных, текущих и оперативных схем технологического процесса первичной обработки молока.

Результаты исследования и их обсуждение. Первичная обработка молока включает в себя следующие технологические операции: очистка молока от механических примесей, охлаждение, хранение, а в отдельных случаях еще сепарирование и пастеризация [4].

Общее количество молока, подлежащее первичной обработке в течение года, определяется по формуле

$$M_{\text{год}} = Y_{\text{год}} \Pi_{\text{к}},$$

где $Y_{\text{год}}$ — среднегодовой удой молока на одну корову, кг;

$\Pi_{\text{к}}$ — поголовье коров на ферме.

Максимальный суточный удой молока

$$M_{\text{сут}} = \frac{M_{\text{год}} K_{\text{г}} K_{\text{ск}}}{365},$$

где $K_{\text{г}}$ — коэффициент, учитывающий годовую неравномерность производства молока;

$K_{\text{ск}}$ — коэффициент, учитывающий сухостойность коров.

Максимальный разовый удой (за одну дойку)

$$M_{\text{раз}} = \frac{M_{\text{сут}} K_{\text{с}}}{i_{\text{д}}},$$

где $K_{\text{с}}$ — коэффициент суточной неравномерности производства молока;

$i_{\text{д}}$ — число доек за день.

Минимальная пропускная способность (кг / с) линии первичной обработки молока, используемая в дальнейшем для подбора ее оборудования по производительности, определяется из соотношения

$$Q_{\text{л}} = \frac{M_{\text{раз}}}{T_{\text{д}}},$$

где $T_{\text{д}}$ — допустимое время на обработку разового удоя, с.

Первая операция после дойки — очистка молока. Для наиболее тонкой очистки молока после доения применяют центробежные молокоочистители, в которых в поле центробежных сил плотные включения смещаются к периферии вращающегося барабана (частота вращения — порядка 8 000 об / мин), а более легкие вытесняются к оси вращения. Очищенное молоко за счет поступления в барабан свежего молока поднимается к напорному диску, через который выводится из барабана.

Пропускную способность центробежного молокоочистителя (кг / с) определяют по зависимости [3]

$$Q_{\text{м.о}} = \rho_{\text{м}} z_{\text{т}} R_{\text{мин}}^2 \omega_{\text{рот}}^2 B_0^2 d_{\text{гр}} \frac{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{пл}}}{\mu} \cos \alpha,$$

где $\rho_{\text{м}}$ — плотность цельного молока, кг / м³;
 $z_{\text{т}}$ — число тарелок очистительного барабана, шт.;
 $R_{\text{мин}}$ — минимальный радиус тарелки, м;
 $\omega_{\text{рот}}$ — угловая скорость вращения барабана, рад / с;
 B_0 — расстояние между тарелками барабана, м;
 $d_{\text{гр}}$ — средний эквивалентный диаметр грязевых частиц, м;
 $\rho_{\text{гр}}$ — плотность грязевых частиц, кг / м³;
 $\rho_{\text{пл}}$ — плотность плазмы молока, кг / м³;
 μ — коэффициент динамической вязкости молока, Па · с;
 α — угол наклона образующей тарелки, рад.

Количество центробежных молокоочистителей выбирают в зависимости от часовой производительности поточной линии:

$$n_{\text{м.о}} = \frac{Q_{\text{л}}}{Q_{\text{м.о}}}.$$

Длительность непрерывной работы сепаратора-очистителя должна обеспечить обработку молока в течение времени доения $T_{\text{д}}$ без разборки сепаратора:

$$T_{\text{м.о}} = \frac{V_{\text{гр}} \rho_{\text{гр}}}{C_{\text{гр}} Q_{\text{м.о}}},$$

где $V_{\text{гр}}$ — объем грязевого пространства барабана, м³;
 $C_{\text{гр}}$ — массовая доля грязевых частиц (сепараторной слизи) в молоке, $C_{\text{гр}} = (0,3...0,6) \cdot 10^{-3}$.

В том случае, если $T_{\text{м.о}} > T_{\text{д}}$, в технологическую линию устанавливают дополнительные магистральные фильтры, уменьшающие загрязненность молока, поступающего в центробежный очиститель.

На некоторых молочно-товарных фермах, а также на предприятиях молочной промышленности осуществляют переработку молока, предусматривающую разделение молока на сливки и обрат сепарированием на механических центрифугах в поле центробежных сил. При этом более плотные составляющие смеси — обезжиренное молоко (обрат) — перемещаются к периферии вращающегося ротора, более легкие — сливки — вытесняются к его центру (рисунок 1).

Разделение молока на сливки и обрат осуществляется в сливкоотделительном барабане, состоящем из пакета разделительных тарелок. Тарелки имеют соосные отверстия, в результате чего в пакете образуется три вертикальных канала для прохода молока. Зазор между соседними тарелками в пакете составляет порядка 0,35...0,50 мм.

Производительность тарельчатого сепаратора (кг / с) для выделения сливок из молока определяется по формуле [3]

$$Q_{\text{сеп}} = \rho_m z_T \operatorname{tg} \alpha (R_{\text{max}}^2 - R_{\text{min}}^2) \omega_{\text{рот}}^2 d_{\text{ш}}^2 \frac{\rho_{\text{пл}} - \rho_{\text{ш}}}{\mu} \eta_{\text{сеп}},$$

где R_{max} , R_{min} — больший и меньший радиусы тарелки, м;

$d_{\text{ш}}$ — диаметр жирового шарика, м;

$\rho_{\text{ш}}$ — плотность жирового шарика, м;

$\eta_{\text{сеп}}$ — КПД сепаратора, $\eta_{\text{сеп}} = 0,5 \dots 0,7$.

В интервале температур $t = 40 \dots 50$ °С, используемых при сепарировании молока, действует зависимость $(\rho_{\text{пл}} - \rho_{\text{ш}}) / \mu = 2900t$, с учетом которой производительность тарельчатого сепаратора может быть записана в следующем виде:

$$Q_{\text{сеп}} = 2900 \rho_m z_T \operatorname{tg} \alpha (R_{\text{max}}^2 - R_{\text{min}}^2) \omega_{\text{рот}}^2 d_{\text{ш}}^2 t \eta.$$

Пренебрегая потерями при сепарировании, количество сливок, получаемых из цельного молока, определяют по формуле

$$G_c = M_{\text{раз}} (Ж_m - Ж_o) / (Ж_c - Ж_o),$$

где $Ж_m$, $Ж_o$, $Ж_c$ — содержание жира в молоке, обрате и сливках соответственно, %.

Время непрерывной работы сепаратора между разборками его барабана в целях удаления грязевых отложений рассчитывается по формуле

$$T_{\text{сеп}} = \frac{V_{\text{гр}} \rho_{\text{гр}}}{C_{\text{гр}} Q_{\text{сеп}}}.$$

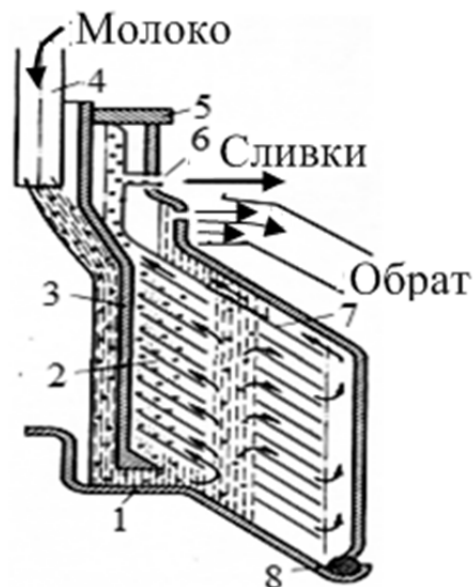
Для исключения ситуаций, способствующих возникновению эпизоотий, молоко подвергают пастеризации. Процесс пастеризации характеризуется двумя параметрами: температурой молока и продолжительностью его обработки. Выделяют три режима пастеризации молока [5]:

1) длительный (LTLT — Low Temperature Long Time) — нагрев молока до температуры 63 °С с последующей выдержкой при этой температуре в течение 30 мин;

2) кратковременный (HTST — High Temperature Short Time) — нагрев молока до температуры 72...75 °С и выдержка в течение 15...20 с;

3) мгновенный — нагрев молока до температуры 85...90 °С с выдержкой до 2 с.

На молокоперерабатывающих предприятиях используют оборудование, работающее в режимах длительной или кратковременной пастеризации. Режим мгновенной пастеризации вытеснен с производства более эффективной ультрапастеризацией или ультравысокотемпе-



1 — дно; 2 — пакет тарелок; 3 — тарелкодержатель; 4 — трубка поплавковой камеры; 5 — гайка; 6 — винт регулировки жирности сливок; 7 — разделительная тарелка; 8 — уплотнитель

Рисунок 1. — Схема работы барабана сепаратора-сливкоотделителя

ратурной обработкой, предусматривающей нагрев молока до температуры 135...140 °С и выдержкой в течение 2...4 с [5].

Пастеризаторы молока для телят, используемые в настоящее время на животноводческих фермах и комплексах, работают преимущественно в режиме длительной пастеризации. По конструктивному исполнению такие пастеризаторы могут быть стационарными и передвижными. Передвижные пастеризаторы, также называемые «молочные такси», представляют собой емкость, смонтированную на трех- или четырехколесном шасси. «Молочное такси» обеспечивает пастеризацию и последующее охлаждение молока, транспортирование его в животноводческое помещение и дозированную раздачу телятам при помощи насоса с питанием от аккумуляторной батареи.

Емкость установки для длительной пастеризации молока представляет собой ванну с двойными стенками из нержавеющей стали, образующими водяную рубашку нагрева или охлаждения. В процессе выполнения технологического процесса ванна заполняется молоком. Затем межстенное пространство заполняется водой до уровня переливной трубы. Вода, подогреваемая трубчатыми электронагревательными элементами, за счет теплообмена через стенки внутреннего корпуса нагревает молоко. Для обеспечения равномерного нагрева молока в ванне перемешивается мешалкой.

Тепловая мощность пастеризатора (Вт) зависит от величины поверхности его нагрева F , коэффициента теплопередачи K_T и средней логарифмической разности температур Δt_{cp} между водой в рубашке нагрева и молоком в ванне пастеризации:

$$\Theta_{\text{паст}} = FK_T \Delta t_{cp},$$

где F — площадь поверхности теплопередачи между рубашкой нагрева и ванной пастеризации, м²;

K_T — коэффициент теплопередачи, Вт / (м² · °С);

Δt_{cp} — средняя логарифмическая разность температур между водой в рубашке нагрева и молоком в ванне пастеризации, °С.

Для одного и того же пастеризатора величина тепловой мощности $\Theta_{\text{паст}}$ может варьироваться в широких пределах в зависимости от температурного режима обработки молока.

Расход электрической энергии (кВт · ч) на пастеризацию определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{паст}} = \frac{M_d c_m (t_{\text{паст}} - t_{\text{нач}})}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{\text{паст}}},$$

где M_d — количество молока, подлежащего пастеризации, кг;

c_m — удельная теплоемкость молока, Дж / (кг · °С);

$t_{\text{паст}}$ — температура пастеризации молока, °С;

$t_{\text{нач}}$ — начальная температура молока, °С;

$\eta_{\text{паст}}$ — тепловой КПД пастеризатора.

В целях сокращения расхода энергии и уменьшения размеров пастеризационно-охлаждающей аппаратуры используют параллельное соединение нескольких пастеризаторов и регенеративные теплообменники. Наибольшее распространение в сельскохозяйственном производстве получили закрытые пластинчатые проточные теплообменники с противоточным движением нагреваемой и охлаждаемой сред.

Рабочую поверхность регенеративного теплообменного аппарата определяют по формуле

$$F_{\text{рег}} = \frac{M_d c_m E_{\text{рег}}}{t_{\text{рег}} (1 - E_{\text{рег}})},$$

где $E_{\text{рег}}$ — коэффициент регенерации;

$t_{\text{рег}}$ — температура регенерированного молока, °С.

Значение коэффициента регенерации определяется соотношением

$$E_{\text{рег}} = \frac{t_{\text{рег}} - t_{\text{нач}}}{t_{\text{паст}} - t_{\text{нач}}}.$$

В первом приближении температура регенерированного молока рассчитывается по формуле

$$t_{\text{рег}} = (1 - E_{\text{рег}})(t_{\text{паст}} - t_{\text{нач}}).$$

Поточно-технологическая линия первичной обработки молока должна отвечать следующим условиям:

- содержание механических примесей в молоке должно соответствовать I степени чистоты молока [6];
- в течение 1...2 ч после дойки молоко должно быть охлаждено до 4...6 °С.

Выбрав оборудование для поточной технологической линии первичной обработки молока, проводят энергетический расчет молочной.

Общая установленная мощность оборудования и освещения в молочной определяется следующим образом:

$$N_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{об}_i} + N_{\text{осв}},$$

где $N_{\text{об}_i}$ — установленная мощность i -го оборудования в молочной, кВт;

$N_{\text{осв}}$ — установленная мощность освещения, кВт.

Установленная мощность освещения

$$N_{\text{осв}} = q_{\text{осв}} S.$$

где $q_{\text{осв}}$ — удельная величина освещения помещения, Вт / м²;

S — площадь молочной, м²; определяется произведением площади $S_{\text{об}}$, занимаемой оборудованием, на коэффициент запаса $K_S = 3...5$.

Общий расход электроэнергии за сутки рассчитывается по формуле

$$W_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{об}_i} T_{\text{об}_i} + N_{\text{осв}} T_{\text{осв}},$$

где $T_{\text{об}_i}$ — продолжительность работы i -го оборудования молочной, ч;

$T_{\text{осв}}$ — продолжительность использования освещения, ч.

При рассмотрении нескольких вариантов комплектации технологической линии первичной обработки молока значение суточного расхода электрической энергии $W_{\text{общ}}$ используется в качестве вспомогательного показателя, характеризующего энергозатраты по соответствующему варианту.

Заключение. Получение положительного эффекта от сложной производственной цепи в животноводстве возможно при внедрении поточного производства. При комплектации технологической линии первичной обработки молока следует учитывать суточный объем производства молока и режим его отправки с фермы на перерабатывающее предприятие. Главной задачей оптимизации технологической линии первичной обработки молока на ферме является подбор комплекта машин и оборудования, расположенных в порядке последовательности выполнения технологических операций с необходимой производительностью.

Список цитированных источников

1. Мишуков, Н. П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока. — М. : Росинформагротех, 2010. — 152 с.
2. Китун, А. В. Основы формирования поточных технологических линий на животноводческой ферме / А. В. Китун, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2021. — № 2. — С. 160—164.
3. Китун, А. В. Организационно-экономическая оценка машин и машинных технологий в животноводстве и птицеводстве : учеб.-метод. пособие / А. В. Китун, И. П. Бусел, В. И. Передня. — Минск, 2008. — 123 с.
4. Современные технологии производства продукции животноводства : рекомендации / В. К. Пестис и [др.] ; под общ. ред. В. К. Пестиса, Е. А. Добрука. — Гродно : ГГАУ, 2011. — 462 с.
5. *Bylund, G. Dairy Processing Handbook.* — Lund : Tetra Pak Processing Systems, 2015. — 482 p.
6. Молоко. Метод определения чистоты : ГОСТ 8218-89. — Введ. 01.01.1990. — М. : Стандартинформ, 2009. — 5 с.

Поступила в редакцию 18.02.2022.

УДК 621.929:636(476)

А. В. Китун, доктор технических наук, профессор,
И. М. Швед

Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЧАСТКА РАЗМЫВА ОСАДКА В НАВОЗОХРАНИЛИЩЕ НАПРАВЛЕННЫМ ДЕЙСТВИЕМ СТРУИ ЖИДКОГО НАВОЗА

При хранении жидкого навоза в навозохранилищах происходит его разделение на фракции с осаждением тяжелой фракции в осадок. Размыв осадка навоза является одним из важнейших показателей процесса перемешивания навозной массы в навозохранилище. Недостаточный размыв осадка приводит к снижению удобрительных свойств органических удобрений, а также уменьшению полезного объема навозохранилища.

Размеры участка размыва осадка зависят от скорости струи навозной массы, создаваемой мешалкой, объема осадка навоза, накопленного в период хранения, и конструктивно-кинематических параметров миксера. Установлена зависимость между глубиной и длиной участка размыва осадка, конструктивными параметрами миксера, физико-механическими свойствами навоза, а также расстоянием участка размыва от сопла кожуха и углом ориентации струеформирующего сопла кожуха. В статье приведены результаты теоретических исследований по определению геометрических параметров участка размыва осадка навоза в навозохранилище миксером, оснащенным кожухом с конусообразным соплом.

Ключевые слова: размыв осадка; объем; площадь; сопло; кожух; жидкий навоз.

Рис. 2. Библиогр.: 15 назв.

A. V. Kitun, DSc in Technical Sciences, Professor,
I. M. Shved

Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", 99 Nezavisimosti Prospekt,
220023 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 272 68 18, terechovich@mail.ru

DETERMINATION OF THE SEDIMENT EROSION AREA PARAMETERS IN THE MANURE STORAGE BY THE DIRECTED ACTION OF A LIQUID MANURE JET

When liquid manure is stored in manure storage facilities, it is divided into fractions with the deposition of a heavy fraction into the sediment. The erosion of the manure sediment is one of the most important indicators of the process of mixing the manure mass in the manure storage. Insufficient erosion of sediment leads to a decrease in the fertilizing properties of organic fertilizers, as well as a decrease in the useful volume of manure storage.

The size of the sediment erosion area depends on the velocity of the manure mass jet created by the agitator, the volume of manure sediment accumulated during storage and the structural and kinematic parameters of the mixer. The relationship between the depth and length of the segment erosion section, the mixer design parameters, the physical and mechanical properties of the manure, as well as the distance of the erosion section from the casing nozzle and the orientation angle of the casing jet-forming nozzle has been established. The article presents the results of theoretical research of determination of the geometric parameters of the manure sediment erosion site in the manure storage with a mixer equipped with a casing with a cone-shaped nozzle.

Key words: sediment erosion; volume; area; nozzle; casing; liquid manure.

Fig. 2. Ref.: 15 titles.

Введение. Образование осадка в навозохранилищах приводит к снижению полезного объема емкости, возникновению коррозионных процессов, приводящих к разрушению и затруднению эксплуатации емкостей, утилизации навоза из хранилища, а также получению некачественных органических удобрений. Для надежной эксплуатации машин и оборудования

и получения качественных органических удобрений жидкий навоз при хранении необходимо периодически перемешивать. Для этих целей применяется миксер, оснащенный кожухом с конусообразным соплом.

В процессе перемешивания жидкого навоза, хранящегося в навозохранилище, первоначально при помощи направленной струи, создаваемой лопастями мешалки миксера, осуществляют размыв осадка.

Обзор литературных источников и анализ формул [1—5] по распределению струи в жидкостной среде и определению параметров размыва осадка позволяет определить основные факторы, от которых зависит максимальная площадь участка размыва.

Исследованиями авторов [6; 7] установлено, что производительность оборудования, выполняющего работу по размыву осадка, зависит от стабильного состояния струи: чем компактнее струя в поперечном сечении, тем большей размывающей способностью она обладает.

Для формирования стабильного состояния струи и увеличения ее мощности миксер оборудуют кожухом с коническим соплом. При этом качество и стабильное состояние струи будут определяться давлением, создаваемым мешалкой, диаметром отверстия сопла кожуха, качеством его обработки и условиями перемещения потока жидкого навоза в хранящейся навозной массе.

Для эффективной работы миксера, оборудованного конусообразным соплом, необходимо установить основные закономерности разрушающей способности струи в процессе размыва осадка (глубину и длину участка размыва), следовательно, установить ее размывающие способности, определив параметры участка размыва.

Материалы и методы исследования. Согласно ГОСТ Р 53042-2008, жидким навозом называется навоз (помет), содержащий от 3 до 8 % сухого вещества.

Жидкий навоз представляет собой многокомпонентную среду. Вязкость ньютоновских жидкостей меняется при разной температуре, а также давлении и не остается величиной постоянной, а изменяется в зависимости от скорости деформаций сдвига [8]. Исследования физико-механических свойств жидкого навоза показали, что при концентрации сухого вещества менее 8 % он является ньютоновской жидкостью [9; 10].

Результаты исследования и их обсуждение. Сущностью размыва осадка навоза является то, что весь процесс осуществляется перемещением струи внутри осадка, характеризующейся глубиной и длиной участка размыва, которые неизвестны и их необходимо определить. При этом разрушение свода осадка в процессе размыва определяется влиянием следующих факторов: кавитационного воздействия струи на осадок; действием усилия, приложенного от воздействия давления струи; ударного воздействия струи на осадок; уменьшения прочности осадка под влиянием усталостных напряжений, вызываемых пульсирующей нагрузкой; размывающего воздействия от скорости струи, а также от физико-механических свойств осадка. В начале процесса размыва профиль фигуры на поверхности размываемого участка может быть подобен профилю струи, имеющей круглое сечение, в которой наибольшая сила давления струи расположена в центре.

Силу давления струи можно определить по формуле [11]

$$F_c = \frac{\gamma}{g} Q V_n \sin \alpha = \rho_c S_c V_n^2 \sin \alpha,$$

- где γ — удельный вес навозной массы, Н / м³;
 g — ускорение свободного падения, м / с²;
 Q — расход навозной массы, выходящей из кожуха, м³ / с;
 V_n — скорость истечения навозной массы в сжатом сечении струи, м / с;
 α — угол наклона струи жидкого навоза, град;
 ρ_c — плотность навозной массы, выходящей из кожуха, кг / м³;
 S_c — площадь поперечного сечения струи, истекающей из сопла, м².

Сила сопротивления размыву осадка навоза будет численно равна силе, которую требуется приложить для перемещения струи в осадке, и в общем случае зависит от плотности осадка, скорости струи, площади соприкосновения струи с осадком и угла атаки струи в осадок. При перемещении струи в осадке формируются вихри, а следовательно, будет возникать турбулентное сопротивление, которое зависит от скорости и линейных размеров струи, а также плотности осадка навоза.

Согласно закону Ньютона, силу турбулентного сопротивления, препятствующего размыву осадка навоза, можно определить по формуле

$$F_o = \rho_o S_L V_L^2 \sin \alpha,$$

где ρ_o — плотность осадка навоза, кг / м³;

S_L — площадь поперечного сечения струи на расстоянии L от сопла, м²;

V_L — скорость струи на расстоянии L от сопла, м / с.

Перемещение струи в осадке будет до тех пор, пока сила давления струи остается больше силы сопротивления размыву, следовательно, будет справедливым условие

$$\rho_c S_c V_c^2 \sin \alpha \geq \rho_o S_L V_L^2 \sin \alpha. \quad (1)$$

Частицы навоза, перемещаемые движущей силой от вращающейся мешалки и приближающиеся к отверстию сопла по радиальным направлениям, по инерции стремятся сохранить свое движение. Приближаясь к отверстию, они огибают его край, что приводит к сжатию струи. Тогда с учетом сжимаемости площадь поперечного сечения струи, истекающей из сопла, определится по формуле

$$S_c = \varepsilon \frac{\pi d_c^2}{4}, \quad (2)$$

где ε — коэффициент сжатия струи;

d_c — диаметр отверстия сопла кожуха, м.

Разрыв осадка характеризуется критической размывающей скоростью потока жидкого навоза, при которой начинается разрушение отдельных частиц осадка и продолжается до момента, когда струя жидкой фракции навоза распадается, так как ее скорость движения стремится к нулю (рисунок 1).

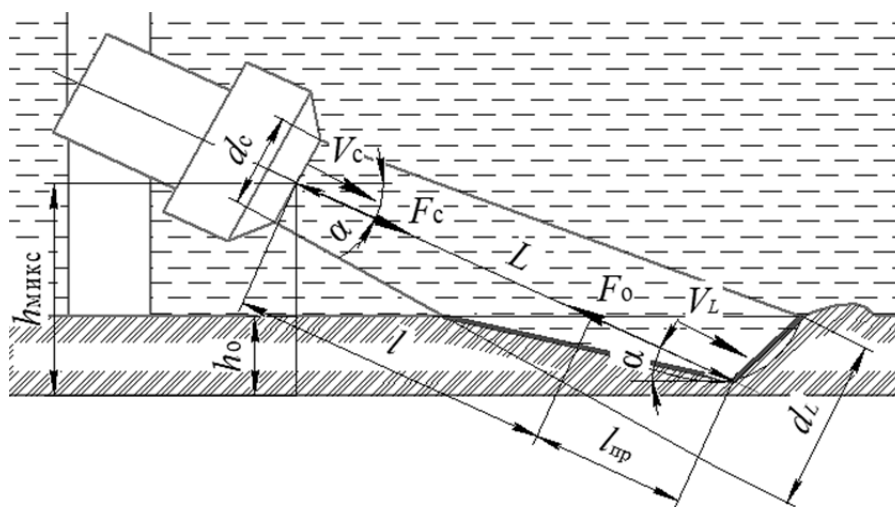


Рисунок 1. — Схема к определению длины проникновения струи в осадок навоза

Скорость истечения навозной массы в сжатом сечении струи определяется по формуле [12]

$$V_n = \mu \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

где μ — коэффициент расхода жидкости;

H — напор навозной массы, м.

Скорость размыва, когда струя жидкой фракции навоза распадается, можно определить по формуле А. Я. Миловича [13]:

$$V_L = \varphi \frac{V_n d_{стр}}{L}, \quad (4)$$

где φ — опытный коэффициент;

$d_{стр}$ — диаметр струи в начальном сечении, м;

L — расстояние от сопла кожуха до участка размыва, м.

Учитывая, что $d_{стр}^2 = \varepsilon d_c^2$, и подставив формулу (3) в формулу (4), определим скорость струи на расстоянии L от сопла:

$$V_L = \varphi \mu \frac{d_c \sqrt{2\varepsilon gH}}{L}. \quad (5)$$

Подставив выражения (2), (3) и (5) в (1), выразим из него площадь поперечного сечения струи на расстоянии L от сопла:

$$S_L = \frac{\pi \rho_c L^2}{4\varphi^2 \rho_o}.$$

Так как струя на протяжении всего процесса размыва сохраняет свою форму, то будет справедливо равенство

$$S_L = \frac{\pi d_L^2}{4} = \frac{\pi \rho_c L^2}{4\varphi^2 \rho_o},$$

где d_L — диаметр струи на расстоянии L от сопла, м.

Из полученного равенства выразим расстояние L от сопла кожуха до участка размыва:

$$L = \varphi d_L \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}. \quad (6)$$

На основании опытов, проводимых с затопленными струями, Г. Н. Абрамович вывел зависимость по определению диаметра струи на расстоянии L от сопла, который можно определить по формуле [14]

$$d_L = 0,475L + d_{стр} = 0,475L + d_c \sqrt{\varepsilon}.$$

Преобразуем выражение (6), подставив в него полученную выше формулу для определения диаметра струи d_L :

$$L = \frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{1 - 0,475\varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}}. \quad (7)$$

Из рисунка 1 видно, что расстояние от сопла кожуха до предельного проникновения струи в осадок навоза состоит из двух составляющих: расстояния от сопла до поверхности осадка l и длины проникновения струи в осадок $l_{\text{пр}}$:

$$L = l + l_{\text{пр}}, \quad (8)$$

где l — расстояние от сопла до поверхности осадка, м;

$l_{\text{пр}}$ — длина проникновения струи в осадок, м.

Расстояние от сопла до поверхности осадка определим по формуле

$$l = \frac{h_{\text{микс}} - h_o}{\sin \alpha}, \quad (9)$$

где $h_{\text{микс}}$ — высота расположения миксера относительно дна хранилища, м;

h_o — высота осадка навоза, м.

Определим длину проникновения струи в осадок, выразив из формулы (8) и подставив в нее выражения (7), (9):

$$l_{\text{пр}} = \frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}} - \frac{h_{\text{микс}} - h_o}{\sin \alpha}. \quad (10)$$

Струя навозной массы, создаваемая миксером и истекающая из сопла кожуха, перемещается в неподвижной жидкой среде. При встрече струи с поверхностью осадка навоза происходит процесс его разрушения. Так как осадок насыщен влагой, следовательно, связи между частицами ослаблены. Под воздействием силы давления струи на осадок жидкая среда навозной массы интенсивно поступает в поры, находящиеся в осадке, и, создавая в них избыточное давление, вызывает его разрушение. При дальнейшем углублении струи в осадок происходит кольцевой размыв и под действием силы тяжести разрушение его верхнего свода.

В процессе разрушения свода формируется наклонная поверхность, угол наклона которой можно рассматривать как угол откоса осадка β_o .

Процесс размыва осадка является следствием приложенной на него силы давления струи. Наибольшая сила давления расположена в центре струи [15], следовательно, максимальное углубление в приямке будет находиться на ее оси, где расположена остаточная часть ядра струи.

Так как размыв осадка имеет неправильные формы, то для упрощения нахождения параметров участка размыва рассмотрим участок в виде треугольника (рисунок 2).

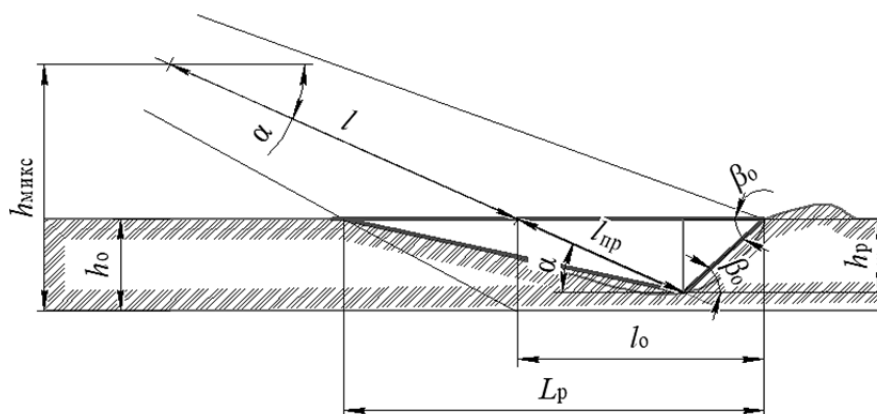


Рисунок 2. — Схема к определению параметров участка размыва осадка навоза

Из рисунка 2 глубину размыва осадка можно определить по следующей формуле:

$$h_p = \frac{l_{np}}{\sin \alpha} = \frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{\left(1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}\right) \sin \alpha} - \frac{h_{микс} - h_o}{\sin^2 \alpha}. \quad (11)$$

Анализ формулы (11) показывает, что глубина размыва осадка зависит от высоты расположения миксера относительно дна навозохранилища, конструктивных параметров сопла кожуха, физико-механических свойств струи и осадка, его высоты, а также угла наклона струи жидкого навоза.

Струя жидкого навоза истекает из отверстия сопла под углом наклона α . При соприкосновении ее с поверхностью осадка навоза форма и характер пятна участка размыва меняются, при этом пятно удлиняется в сторону наклона струи. Участок размыва при этом приобретает форму эллипса с полуосями: малой полуосью, равной диаметру струи на поверхности участка размыва осадка d_l , и большой полуосью, равной половине длины участка размыва $0,5L_p$ или из рисунка 2

$$L_p = 2l_o, \quad (12)$$

где L_p — длина участка размыва осадка навоза, м;

l_o — длина большей полуоси пятна участка размыва осадка навоза, м.

Из теоремы синусов определим длину большей полуоси пятна участка размыва осадка навоза:

$$\frac{l_o}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta_o))} = \frac{l_{np}}{\sin \beta_o}, \quad (13)$$

где β_o — угол откоса наклонной поверхности на участке размыва, град.

Тогда из формулы (13) с учетом уравнения (10) длина большей полуоси пятна участка размыва осадка навоза определится из следующего выражения:

$$l_o = \left(\frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}} - \frac{h_{микс} - h_o}{\sin \alpha} \right) \frac{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta_o))}{\sin \beta_o}. \quad (14)$$

Определим длину участка размыва осадка навоза, подставив в уравнение (12) полученное выражение (14):

$$L_p = \frac{2 \sin(180^\circ - (\alpha + \beta_o))}{\sin \beta_o} \left(\frac{\varphi d_c \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_o}{\rho_c}}}{1 - 0,475 \varphi \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_c}}} - \frac{h_{микс} - h_o}{\sin \alpha} \right). \quad (15)$$

Формула (15) позволяет рассчитать длину размыва осадка навоза, которая зависит от конструктивных параметров сопла миксера, физико-механических свойств струи и осадка, высоты расположения миксера относительно дна навозохранилища и высоты осадка навоза, а также угла наклона струи жидкого навоза на поверхность осадка.

Закключение. В результате проведенных теоретических исследований было установлено, что угол наклона струи жидкого навоза на поверхность осадка влияет на размывающие способности оборудования.

При использовании уравнения (15) следует учитывать, что длина размываемого участка зависит от высоты осадка и будет изменяться при изменении диаметра отверстия сопла кожуха, высоты расположения миксера относительно дна навозохранилища и угла наклона струи жидкого навоза.

Список цитированных источников

1. Эколого-экономическое управление охраной окружающей среды / А. Г. Ананенков [и др.]. — М. : Недра, 2004. — 230 с.
2. Чугаев, Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости) : учебник / Р. Р. Чугаев. — М. : Бастет, 2008. — 672 с.
3. Руководство по гидравлическим расчётам малых искусственных сооружений и русел. — 3-е изд., перераб. и доп. : утв. «ГИПРОТРАНСТЭИ» МПС : введ. 01.01.1967. — М. : Транспорт, 1967. — 224 с.
4. Оборудование резервуаров : учеб. пособие / Н. И. Коновалов [и др.]. — Уфа : ДизайнПолиграф-Сервис, 2004. — 212 с.
5. Кононов, О. В. Анализ и классификация существующих способов борьбы с отложениями в нефтяных емкостях / О. В. Кононов, Б. Н. Мастобаев // История науки и техники. — 2010. — № 6. — С. 60—68.
6. Совершенствование систем предотвращения накопления донных нефтяных отложений в резервуарах большой вместимости / В. Н. Александров [и др.] // Нефтяное хоз-во. — 2001. — № 2. — С. 70—72.
7. Штеренлихт, Д. В. Гидравлика : учеб. для вузов : в 2 кн. / Д. В. Штеренлихт. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — Кн. 2. — 367 с.
8. Караева, Ю. В. Оценка динамической вязкости субстратов, используемых для получения биогаза / Ю. В. Караева, И. А. Трахунова // Технические науки — от теории к практике : сб. ст. по материалам XXV Междунар. науч.-практ. конф., № 8 (21). — Новосибирск : СибАК, 2013. — С. 84—90.
9. Ворожцов, О. В. Обоснование технологических и конструктивных параметров перемешивающего устройства, обеспечивающего гомогенизацию жидкого свиного навоза при его хранении в плёночных навозохранилищах : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / О. В. Ворожцов. — СПб., 2018. — 195 л. : ил.
10. Трахунова, И. А. Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов в метантенке с гидравлическим перемешиванием на основе численного эксперимента : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / И. А. Трахунова. — Казань : КНЦ РАН, 2014. — 114 л.
11. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод / Т. В. Артемьева [и др.]. — 2-е изд., стер. — М. : Академия, 2006. — 336 с.
12. Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической технологии / А. Н. Плановский, В. М. Рамм, С. З. Каган. — М. : Химия, 1967. — 848 с.
13. Милович, А. Я. Вихревая теория направляющего аппарата и камеры турбины / А. Я. Милович. — М. : Тип. Рус. Товарищества, 1912. — 62 с.
14. Абрамович, Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. — М. : ЭКОЛИТ, 2011. — 720 с.
15. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения / П. А. Ребиндер, Е. Д. Щукин // Успехи физ. наук. — 1972. — Т. 108, № 9. — С. 3—42.

Поступила в редакцию 12.01.2022.

УДК 631.544.7

К. Л. Пузевич¹, кандидат технических наук, доцент,
В. И. Коцуба¹, кандидат технических наук, доцент,
В. В. Пузевич¹, кандидат технических наук, доцент,
А. И. Филиппов², кандидат технических наук, доцент

¹Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, +375 (29) 547 62 15, baa_mgishp@mail.ru

²Учреждение образования «Гродненский государственный аграрный университет», ул. Терешковой, 28, 230008 Гродно, Республика Беларусь, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru

АГРЕГАТЫ ДЛЯ ПОСЕВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПОД МУЛЬЧИРУЮЩУЮ ПЛЕНКУ

Урожайность культур и качество выращиваемого продукта в первую очередь зависят от почвы и ее состояния. Поэтому в статье приведены данные, свидетельствующие о необходимости мульчирования почвы, анализ способов посева через мульчирующую пленку и описание конструкции применяемых агрегатов. Отмечена актуальность разработки конструкций посевных агрегатов, способных осуществлять посев пропашных культур под мульчирующую пленку. Учитывая, что в Республике Беларусь отсутствуют машины для реализации данной технологии возделывания, а зарубежные аналоги являются весьма дорогостоящими, обоснована необходимость разработки комбинированного агрегата, позволяющего осуществлять посев пропашных культур под мульчирующую пленку. Такой агрегат должен быть оснащен высевальным аппаратом, который обеспечивает дозирование семян, пробитие пленки с требуемым шагом, формируя при этом семенное ложе и укладывание семян в почву.

Ключевые слова: мульчирующая пленка; комбинированный агрегат; посев пропашных культур; пленкоукладчик; сеялка; перфорированная пленка.

Рис. 8. Табл. 1. Библиогр.: 15 назв.

K. L. Puzevich¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. I. Kotsuba¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. V. Puzevich¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. I. Filippov², PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹Educational Institution “Belarusian State of the Orders of October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy”, 5 Michurina Str., 213407 Gorki, the Republic of Belarus, +375 (29) 547 62 15, baa_mgishp@mail.ru

²Educational Institution “Grodno State Agrarian University”, 28 Tereshkova Str., 230008 Grodno, the Republic of Belarus, +375 (29) 396 29 66, a.fil07@mail.ru

AGGREGATES FOR SOWING AGRICULTURAL CROPS UNDER MULCHING FILM

Crop yields and the quality of the grown product primarily depend on the soil and its condition. Therefore, the article provides data indicating the need for soil mulching, an analysis of sowing methods through a mulching film and the description of the used aggregates design. The urgency of the development of sowing units' designs capable of row crops sowing under a mulching film is noted. Considering that in the Republic of Belarus there are no machines for the implementation of this cultivation technology, and foreign analogues are very expensive, the need for the development of a combined unit allowing the row crops sowing under a mulching film is justified. Such an aggregate should be equipped with a seeding apparatus that provides seed dosing, penetration of the film with the required step, forming a seedbed and placing seeds in the soil.

Key words: mulching film; combined unit; row crops sowing; film-laying machine; seeder; perforated film.

Fig. 8. Table 1. Ref.: 15 titles.

Введение. Качество почвы в первую очередь определяет успех любого аграрного проекта. Почва — сложнейшая система взаимодействующих между собой минералов, органических соединений и живых организмов, формировавшаяся миллионы лет, но очень хрупкая и легко разрушаемая неразумным хозяйствованием.

Урожайность культур и качество выращиваемого продукта прежде всего зависят от почвы и ее состояния. Поэтому важно позаботиться о ее защите от неблагоприятных погодных условий. Одним из эффективных методов является мульчирование [1].

Мульчирование — это защита почвы укрывным материалом (либо естественным путем, образовавшимся на том же поле, либо специально завезенным на участок органическим или синтетическим). Почву необходимо защищать от водной и ветровой эрозии, пересыхания, переуплотнения ливнями и градом, зарастания сорняками, переувлажнения, перегрева и переохлаждения [1; 2].

Мульчирование почвы применяется для повышения урожайности различных культур и улучшения качества продукции. С помощью мульчирования можно получить более ранний и богатый урожай, а также снизить использование пестицидов. Растения будут более здоровые, а плоды сочные и хорошего товарного вида. Используя мульчирование, очень эффективно выращивать теплолюбивые овощи, такие как перец, томаты и кукуруза [2].

Материалы и методы исследования. В настоящее время существует множество материалов для мульчирования, их можно отнести к следующим группам: органическая (природная) мульча, неорганическая мульча и синтетические материалы [3].

Самым технологичным и универсальным мульчирующим материалом является полиэтиленовая пленка. В ряде зарубежных стран (Япония, США, ФРГ, Франция, Италия и др.) пленочное мульчирование стало обычным технологическим приемом при культивировании растений в открытом и защищенном грунте на тысячах гектаров [4].

Мульчирующую пленку используют для защиты сельскохозяйственных культур от агрессивных условий окружающей среды. Она задерживает испарение влаги и способствует равномерному ее распределению как в верхних, так и в нижних горизонтах почвы, что играет положительную роль не только в районах с недостаточным увлажнением, так как экономия воды при этом составляет около 60 %; ускоряет биологические процессы в почве; обеспечивает лучшее снабжение растений питательными веществами; активно используется для сохранения тепла и борьбы с сорняками. Все это положительно сказывается на росте и развитии растений, ускоряет созревание и увеличивает урожай от 40 до 60 % [5].

Результаты исследования и их обсуждение. Ряд зарубежных фирм выпускают машины для высева семян и мульчирования посевов пленкой. При этом возможны две схемы посева [6].

Первый способ предполагает посев семян сеялками точного посева с последующим укрыванием посевов пленкой. Этот процесс можно осуществить, используя однооперационные машины (что в настоящее время и применяется в нашей стране) или комбинированные агрегаты. Для данной технологии ПООО «Техмаш» (г. Лида, Республика Беларусь) выпускает пленкоукладчики УПТ-1 и ПУ-1,5, технические характеристики которых представлены в таблице 1.

Пленкоукладчик УПТ-1 [7] предназначен для мульчирования почвы пленкой или укрывным материалом, а также для укладки ленты капельного орошения с одновременным внесением удобрений и пробивкой отверстий с заданным шагом; возможна также установка гребнеобразователя с отвалами для формирования профиля гряды. Он представляет собой навесную машину (рисунок 1), состоящую из несущей рамы 1, являющейся основной несущей частью машины и представляющей собой сварную конструкцию, на которой крепятся: треугольник автосцепки 2, два регулируемых по высоте опорных колеса 3. На стойке 5 рамы устанавливаются барабаны 4 для лент капельного полива. Концы ленты капельного полива заправляются в регулируемые по ширине стойки 6. По краям рамы установлены маркеры 24.

На стойках 7 рамы устанавливается ось 8 для размещения рулона с пленкой. Фиксация рулона от осевого смещения осуществляется подвижными упорами 9. Ось в стойках устанавливается в двух подшипниках. Для предотвращения самопроизвольного разматывания рулона при резких остановках трактора с одной стороны оси установлен подпружиненный тормоз 10. В нижней части рамы в двух подшипниках устанавливается направляющий вал 16, который служит для более равномерного укладывания пленки на почву и предотвращения повреждений укрывного материала.

Т а б л и ц а 1. — Технические характеристики пленкоукладчиков ПУ-1,5 и УПТ-1 [7; 8]

Показатель	Значение	
	ПУ-1,5	УПТ-1
Тип машины	Навесная	
Масса машины, кг, не более	400	500
Габаритные размеры, мм, не более		
– длина	2 350	2 200
– ширина	2 350	2 450
– высота	1 100	1 700
Производительность:		
– за один час основного времени, га	0,45...0,75	0,15...0,45
– за один час эксплуатационного времени, га	0,25...0,45	0,10...0,27
Рабочая скорость, км / ч	3...5	1...3
Транспортная скорость, км / ч, не более	15	
Шаг пробивки отверстий в пленке, мм	25, 50	20, 30, 40, 50
Ширина пленки, см, не более	150	190
Количество обслуживающего персонала, человек	1 (тракторист)	
Рабочая ширина захвата, м	1,5	
Дорожный просвет, мм, не менее	300	
Класс тяги трактора, кН	0,6...1,4	

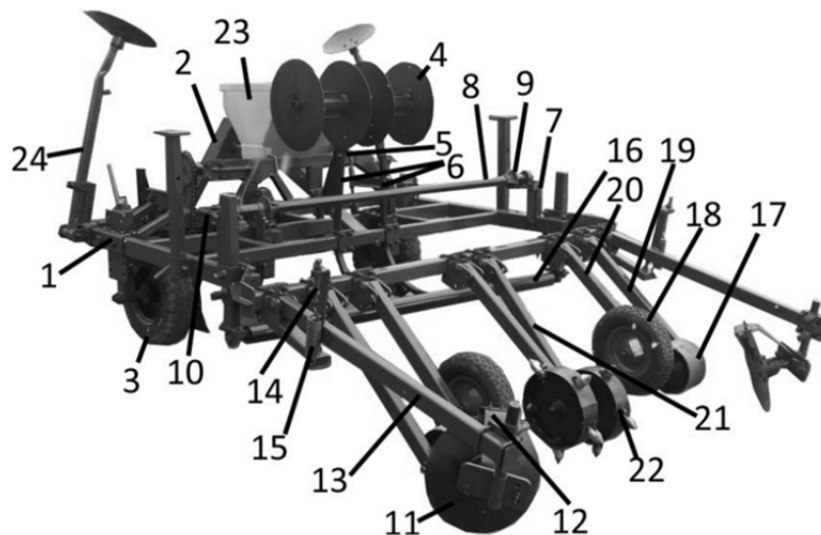


Рисунок 1. — Устройство пленкоукладчика УПТ-1

Задние диски 11 с чистиками 12, расположенные на кронштейнах 13, предназначены для присыпания с двух сторон почвой уложенной пленки. Заглубление дисков устанавливается с помощью винта 14 с пружиной 15. Имеется возможность установки дисков по расстоянию в зависимости от ширины укладываемой пленки. Прикатывание уложенной пленки осуществляется колесами 17 и 18. Колесо с шиной 18 осуществляет обжатие пленки вдоль края трапеции при укладке на гряде, а колеса 17 выравнивают края укрывного материала для предотвращения изгибов и заламываний пленки. В зависимости от размеров пленки расположение колес 17 и 18 регулируется по ширине установки смещением вдоль рамы кронштейнов 19 и 20.

В задней части машины на кронштейнах 21 устанавливаются колеса 22 для пробивки в пленке отверстий. Шарнирное крепление кронштейнов обеспечивает копирование рельефа почвы. Шаг пробивки отверстий, а также количество строчек зависят от высаживаемой культуры. Колеса имеют возможность регулировки по ширине установки. Также имеется возможность установки туковысевающего аппарата 23 с приводом от опорных колес. Регулировка норм высева осуществляется сменными звездочками. Процесс работы пленкоукладчика представлен на рисунке 2.

Пленкоукладчик ПУ-1,5 [8] предназначен для мульчирования почвы пленкой или укрывным материалом, а также для укладки ленты капельного орошения; возможна установка колес для пробивки отверстий в пленке. Он представляет собой навесную машину (рисунок 3), состоящую из несущей рамы 1, являющейся основной несущей частью машины и представляющей собой сварную конструкцию, на которой крепятся: уши для навески на трактор 2, два регулируемых по высоте опорных колеса 3. На двух стойках 5 рамы устанавливается съемная ось 4 для лент капельного полива с подвижными упорами 6. Концы ленты капельного полива заправляются в регулируемые по ширине стойки 7.

На стойках 9 рамы устанавливается ось 8 для размещения рулона с пленкой. Фиксация рулона от осевого смещения осуществляется подвижными упорами 10. Ось в стойках устанавливается в двух подшипниках, прижимаемых сверху пластинами 11. Для предотвращения самопроизвольного разматывания рулона при резких остановках трактора с одной стороны оси установлен подпружиненный тормоз 12.

Передние диски 13 предназначены для разуплотнения почвы за колесами машины и выравнивания почвы для укладки пленки. Диски регулируются по углу атаки, величине заглубления и расстоянию между дисками в зависимости от ширины укладываемой пленки. Задние диски 14 с чистиками 15 установлены на оси 16 и предназначены для присыпания с двух сторон почвой уложенной пленки. Заглубление дисков устанавливается с помощью винта 17. Имеется возможность установки дисков по расстоянию в зависимости от ширины укладываемой пленки.

Прикатывание уложенной пленки осуществляется бандажными колесами 18, расположенными на одной оси с задними дисками. В зависимости от размера укладываемой пленки колеса регулируются по ширине и высоте установки.



Рисунок 2. — Процесс работы пленкоукладчика УПТ-1

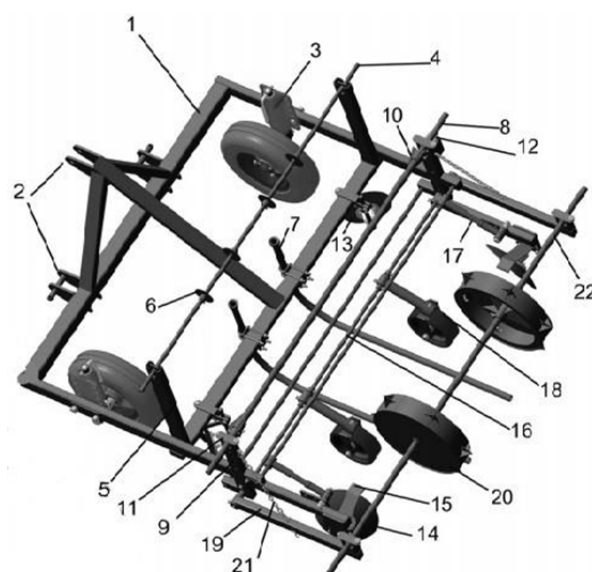


Рисунок 3. — Пленкоукладчик ПУ-1,5

В задней части машины на поворотной рамке 19 на оси 22 устанавливаются колеса 20 для пробивки в пленке отверстий. Шарнирное крепление рамки обеспечивает копирование рельефа почвы. Шаг пробивки отверстий зависит от высаживаемой культуры. Колеса имеют возможность регулировки по ширине установки. Для фиксации при переездах и в транспортном положении рамка устанавливается на двух гибких тягах 21.

Пленкоукладчики-грядообразователи AL-S14 PLUS и PLASTIC-STOP PLUS фирмы Checchi & Magli (Италия) (рисунок 4) образуют уплотненные ровные грядки, закрываемые пленкой, которые потом окучиваются. Рабочий процесс осуществляется при помощи переднего колеса из нержавеющей стали, которым земля уплотняется и трамбуется, парного ролика-разматывателя рулонов (нейлон, бумага, целлюлоза, биоразлагаемые материалы) шириной до 1,4 м и регулируемых в двух направлениях прижимных валиков, позволяющих укладывать пленку на возвышенностях и рельефных выступах. Конструкция машины позволяет использовать ее для формирования гряд или для укладки пленки отдельно. Также можно укладывать ленту капельного орошения [9].

Основным недостатком однооперационных машин является увеличение числа проходов машинно-тракторных агрегатов по полю, что неблагоприятно сказывается на развитии растений. Примером комбинированного агрегата являются сеялки SAMCO различных модификаций производства Samco Agricultural Manufacturing LTD (Ирландия) для посева кукурузы под мульчирующую пленку [10]. Сеялки фирмы SAMCO за один проход осуществляют внесение гербицидов, высев семян и укрытие их биоразлагаемой пленкой, имеют четыре типоразмера: двухрядная SAMCO 2200, четырехрядная SAMCO 41HD, шестирядная SAMCO 7100 и восьмирядная SAMCO 80PT.

Сеялка SAMCO 41HD (рисунок 5) имеет каток в передней части для образования твердого семенного ложа с постоянной глубиной посева. Этот каток также является приводной передачей для высевальных элементов. Посев осуществляется пневматическим дисковым высевальным устройством Optima HD Kverneland. После прохода высевального аппарата почва укрывается биоразлагаемой пленкой. При этом одной полосой пленки укрываются два ряда кукурузы.



а)



б)

**Рисунок 4. — Пленкоукладчики-грядообразователи фирмы Checchi & Magli:
а — AL-S14 PLUS; б — PLASTIC-STOP PLUS**



Рисунок 5. — Сеялка SAMCO 41HD

Однако этот способ пригоден только для специальных биоразлагаемых пленок с перфорацией, так как пленка прорывается ростками растений.

Второй способ предполагает подготовку почвы, укрытие ее пленкой и посев семян через пленку. Процесс посева подразумевает доставку семян в почву путем образования отверстия в пленке. Способ посева через пленку является более универсальным, так как позволяет применять различные укрывные материалы.

В сеялке ModulaJet производства Forigo Roteritalia (Италия) (рисунок 6) семена пневматически отделяются, затем ускоряются в потоке воздуха и через пленку выстреливаются на землю. Это создает очень маленькое отверстие прямо над семенем, которое слишком мало для развития сорняков. Глубина заделки семян регулируется скоростью воздушного потока. Маленькие отверстия в пленке значительно снижают скорость развития сорняков, сокращая последующую послевсходовую обработку. Пневмосистема лучше всего работает с крупными семенами, такими как кукуруза или соя, что несколько ограничивает диапазон применения сеялки. Также необходимо учитывать, что при прохождении семени через пленку возрастает риск нарушения его цельной оболочки или травмирования.

Компания SAMCO производит сеялку PM 8220 (рисунок 7), которая уплотняет почву, укладывает пленку и точно высевает семена с помощью перфоратора колесного блока, обеспечивающего точную глубину посева и расстояние между семенами [11]. Сеялка позволяет осуществлять посев в пленку шириной 1,2...2,2 м, а также устанавливать расстояние между семенами в ряду от 23 до 75 см и расстояние между рядами семян от 10 до 250 см.

В сеялке используются два типа систем доставки семян. При первом способе семена пневмосистемой распределяются по перфорированным отверстиям. Это позволяет выбрать количество семян, посеянных на одно отверстие. Чтобы достичь целевого процента всхожести или в соответствии с существующей системой выращивания, можно высевать от 1 до 20 семян на отверстие. Это достигается подбором перфораторного колеса, чтобы оно соответствовало размерам семян и норме посева. При втором способе используются высевальные аппараты точного посева Kverneland Accord, позволяющие высевать одно семя на отверстие. Настройка на культуру и регулировка нормы посева осуществляются сменой семенного диска и подбором перфораторного колеса.

Комбинированная машина для посева с мульчированием пленкой Spapperi SMP производства фирмы Spapperi NT SRL (США) состоит из пневматической сеялки и пленкоукладчика (рисунок 8) и позволяет за один проход замульчировать почву пластиковой пленкой или укрывным материалом, пробить отверстия в пленке, высевать семена диаметром от 4 мм через эти отверстия и прикатать их сверху. Дополнительно сеялка может быть оборудована приспособлением для укладки под пленку ленты капельного орошения [12].



Рисунок 6. — Сеялка ModulaJet



Рисунок 7. — Сеялка SAMCO PM 8220



Рисунок 8. — Комбинированная машина для посева с мульчированием пленкой Srapperi SMP

Передний каток выравнивает почву и подготавливает семенное ложе. Центральный ролик укладывает на почву пленку, которую удерживают боковые колеса. Затем загортаци присыпают края пленки почвой с каждой стороны для надежной фиксации. После этого колеса сеялки со специальными трубками присасывают семена из бункеров, пробивают пленку и, когда каждая труба достигает вертикального положения, укладывают семена в почву. В конце маленькие колеса прикатывают семена под пленкой. Такая конструкция обеспечивает однородный и точный высев на одинаковую глубину и минимальное повреждение пластиковой пленки для ограничения испарения влаги. Сеялка обеспечивает расстояние между рядами 35...75 см, расстояние между семенами в ряду — 18 см, глубину посева — 4,5 см. Возможна комплектация высевальными колесами для других значений расстояния между семенами и глубины посева.

Таким образом, механическое повреждение пленки высаживающими рабочими органами с одновременным высевом семян является наиболее перспективным направлением.

Заключение. Разработка конструкций посевных агрегатов для осуществления посева пропашных культур под мульчирующую пленку является актуальным направлением. Однако в Республике Беларусь отсутствуют машины для реализации данной технологии возделывания, а зарубежные аналоги являются весьма дорогостоящими [3; 13].

Следовательно, требуется разработка комбинированного агрегата, позволяющего осуществлять посев пропашных культур под мульчирующую пленку, оснащенного высевальным аппаратом, который обеспечивает дозирование семян, пробитие пленки с требуемым шагом, формируя при этом семенное ложе и укладывание семян в почву. При этом не должно происходить забивание высевальных рабочих органов почвой или пленкой [14; 15].

Список цитированных источников

1. Посев сельскохозяйственных культур под мульчирующую пленку / К. Л. Пузевич [и др.] // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / редкол.: В. Р. Петровец [и др.]. — Горки : БГСХА, 2020. — Вып. 5. — С. 163—166.
2. Дудка, В. Мульчирование почвы / В. Дудка // Лидер-Агро. — 2018. — № 12 (22).
3. Анализ способов мульчирования / К. Л. Пузевич [и др.] // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. тр. / редкол.: А. М. Михальченко [и др.]. — Брянск : БрГАУ, 2021. — С. 159—166.
4. Анализ машин для посева пропашных культур под мульчирующую пленку / В. И. Коцуба [и др.] // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. тр. / редкол.: А. М. Михальченко [и др.]. — Брянск : БрГАУ, 2020. — С. 107—113.
5. Способы мульчирования грунта [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://vladam-seeds.com.ua/ru/agronomiya/sposoby-mulchirovaniya-grunta>. — Дата доступа: 25.11.2021.
6. Коцуба, В. И. Анализ машин для посева пропашных культур под мульчирующую пленку / В. И. Коцуба, К. Л. Пузевич, В. В. Пузевич // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / редкол.: В. Р. Петровец [и др.]. — Горки : БГСХА, 2021. — Вып. 6. — С. 71—75.
7. Пленкоукладчик УПТ-1 : рук. по эксплуатации УПТ 00.000 РЭ. — Лида, 2018. — 11 с.
8. Пленкоукладчик ПУ-1,5 : рук. по эксплуатации ПУ 00.000 РЭ. — Лида, 2014. — 16 с.
9. Bed maker/mulching film layer AL-S14 PLUS [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.checchiemagli.com/en/machines/bed-maker-mulching-film-layer-al-s14-plus>. — Access date: 25.11.2021.
10. SAMCO 41HD [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.samco.ie/machinery/40-hd-2>. — Access date: 25.11.2021.

11. Punch film layer [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.samco.ie/machinery/punch-film-layer> . — Access date: 25.11.2021.
12. SMP pneumatic seed drill [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.spapperi.com/en/product/smp-en> . — Access date: 25.11.2021.
13. Анализ мульчирующих пленок / К. Л. Пузевич [и др.] // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / редкол.: В. Р. Петровец [и др.]. — Горки : БГСХА, 2021. — Вып. 6. — С. 135—137.
14. Теоретические основы движения рабочих органов для посева под мульчирующую пленку / В. И. Коцуба [и др.] // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. тр. / редкол.: А. М. Михальченков [и др.]. — Брянск : БрГАУ, 2021. — С. 241—245.
15. Анализ машин для посева под мульчирующую пленку и обоснование движения их рабочих органов / В. И. Коцуба [и др.] // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2021. — № 3. — С. 146—150.

Поступила в редакцию 13.03.2022.

УДК 621.928:633.521

В. А. Шаршунов¹, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси,
С. В. Курзенков², кандидат технических наук, доцент,
В. А. Левчук², М. В. Цайц²

¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет пищевых и химических технологий»,
пр-т Шмидта, 3, 212027 Могилев, Республика Беларусь, 8 (0222) 64 82 27

²Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213410 Горки,
Республика Беларусь, +375 (25) 906 37 38, baa_bgd@tut.by

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СЕМЕННОЙ КОРОБОЧКИ ЛЬНА

В статье представлен теоретический анализ деформации семенной коробочки льна при ее поперечном сжатии с учетом возникающих упругих деформаций в ее оболочке. Получены аналитические зависимости для определения величин проекций деформаций точек, лежащих на поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии.

Разработана методика, а также проведены экспериментальные исследования по определению величины упругой деформации семенной коробочки льна и характера ее разрушения. Получены данные, определяющие взаимосвязь величины сжатия семенной коробочки льна и значений силы сжатия при этом, для различных диаметров семенных коробочек льна. Определены значения зависимости механического напряжения, возникающего в семенной коробочке от ее относительной деформации. Получены расчетные значения величин модуля Юнга для семенных коробочек различного диаметра. Установлены значения предельной величины сжатия семенной коробочки, определяющей момент ее разрушения.

Ключевые слова: лен; семенная коробочка; деформация; упругое напряжение; модуль Юнга; разрушение семенной коробочки; поперечное сжатие.

Рис. 3. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.

V. A. Sharshunov¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus,
S. V. Kurzenkov², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. A. Levchuk², M. V. Tsaits²

¹Educational Institution "Belarusian State University of Food and Chemical Technologies", 3 Schmidt Ave.,
212027 Mogilev, the Republic of Belarus, 8 (0222) 64 82 27

²Educational Institution "Belarusian State Order of the October Revolution and the Red Banner of Labor Agricultural Academy", 5 Michurina Str., 213410 Gorki, the Republic of Belarus, +375 (25) 906 37 38, baa_bgd@tut.by

INVESTIGATION OF THE NATURE OF FLAX SEEDPODS DEFORMATION AND DESTRUCTION

The article presents a theoretical analysis of the deformation of the flax seedpod during its transverse compression, taking into account the resulting elastic deformations occurring in its shell. Analytical dependencies to determine the values of projections of points deformations lying on the surface of a flax seed pod during its compression were obtained.

A technique has been developed and experimental studies have been carried out to determine the magnitude of the elastic deformation of the flax seedpod, as well as the nature of its destruction. The data determining the relationship between the compression value of the flax seedpod and the values of the compression force at the same time, for various diameters of the flax seedpods were obtained. The values of the dependence of the mechanical stress arising in the seedpod on its relative deformation are determined. Calculated values of Young's modulus values for seedpods of various diameters have been obtained. The values of the limiting value of compression of the seedpod, determining the moment of its destruction are established.

Key words: flax; seed box; deformation; elastic stress; Young's modulus; destruction of the seedpod; transverse compression.

Fig. 3. Table 1. Ref.: 8 titles.

Введение. Основополагающим технологическим процессом получения семян является процесс отделения семенной части урожая льна-долгунца от стеблей, который издавна осуществляется двумя принципиально различными способами: отрывом коробочек льна от стеблей (очес) или разрушением коробочек на стеблях (обмолот) с последующей сепарацией [1].

В разработанном в УО БГСХА обмолачивающем устройстве для линии первичной переработки льна Van Dommele или Depoortere процесс отделения семенной части от стеблей льна происходит за счет комбинированного (очесывающе-плющильного) воздействия эластичного рабочего органа [2—4]. В процессе плющения разработанным обмолачивающим устройством происходит поперечное сжатие семенных коробочек льна и их разрушение с выделением семян [5].

При моделировании деформации формы коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой в процессе обмолота [5] было установлено, что деформация семенной коробочки льна происходит неравномерно, а величина поперечного сжатия не равна продольному расширению. Это связано с упругими свойствами семенной коробочки.

Таким образом, целью работы является определение проекций деформаций точек поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии, а также изучение упругих свойств ее материала и характера разрушения.

Материалы и методы исследования. Проанализируем деформацию семенной коробочки льна при ее сжатии на основании изменения проекций вектора деформации. Для этого рассмотрим идеализированную модель, при которой, сжимая коробочку льна на величину Δ_{kz} вдоль вертикальной оси симметрии, ее поверхностные точки осуществляют переход на поверхность некоторого эллипсоида. Будем считать, что такое смещение до разрыва (разрушения) коробочки происходит симметрично располагающихся на ее поверхности поперек вертикальной оси симметрии и при неизменной величине вектора деформации в любой ее точке, т. е.

$$|\vec{\Delta}_i| = \sqrt{\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2 + \Delta_{zi}^2} = \text{const} . \quad (1)$$

Для того чтобы проанализировать пространственные деформации точек семенной коробочки льна при сжатии, представим ее в виде шара с центром в точке $O_k(0; 0; 0)$ и диаметром, равным d_k . Тогда уравнение такого шара примет следующий вид:

$$x^2 + y^2 + z^2 = \frac{d_k^2}{4} . \quad (2)$$

В точку O_k поместим и центр эллипсоида с полуосями: $d_k / 2 + \Delta_{kx} / 2$ — по оси O_kx ; $d_k / 2 + \Delta_{ky} / 2$ — по оси O_ky ; $d_k / 2 - \Delta_{kz} / 2$ по оси O_kz , который представляет собой геометрическую модель деформируемой коробочки. Математическое уравнение такой поверхности будет иметь следующий вид:

$$\frac{x^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{ky}}{2}\right)^2} + \frac{z^2}{\left(\frac{d_k - \Delta_{kz}}{2}\right)^2} = 1 ,$$

где Δ_{kx} , Δ_{ky} , Δ_{kz} — величины, характеризующие деформации формы шара в направлениях осей пространственной декартовой системы координат, м.

Ввиду того, что при сжатии семенная коробочка не ограничена с боков, то смещения поверхностных ее точек в направлениях осей O_kx и O_ky плоскости xO_ky на поверхность эллипсоида примем одинаковыми: $\Delta_{kx} = \Delta_{ky}$. При этом уравнение эллипсоида запишется в виде

$$\frac{x^2}{\left(\frac{d_K}{2} + \frac{\Delta_{Kx}}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{d_K}{2} + \frac{\Delta_{Ky}}{2}\right)^2} + \frac{z^2}{\left(\frac{d_K - \Delta_{Kz}}{2}\right)^2} = 1. \quad (3)$$

Определим величину деформации семенной коробочки в некоторой точке $O(0; 0; d_K/2)$, в которой верхняя плоскость давит, смещаясь вдоль ее вертикальной оси на $\Delta_{Kz}/2$ (рисунок 1).

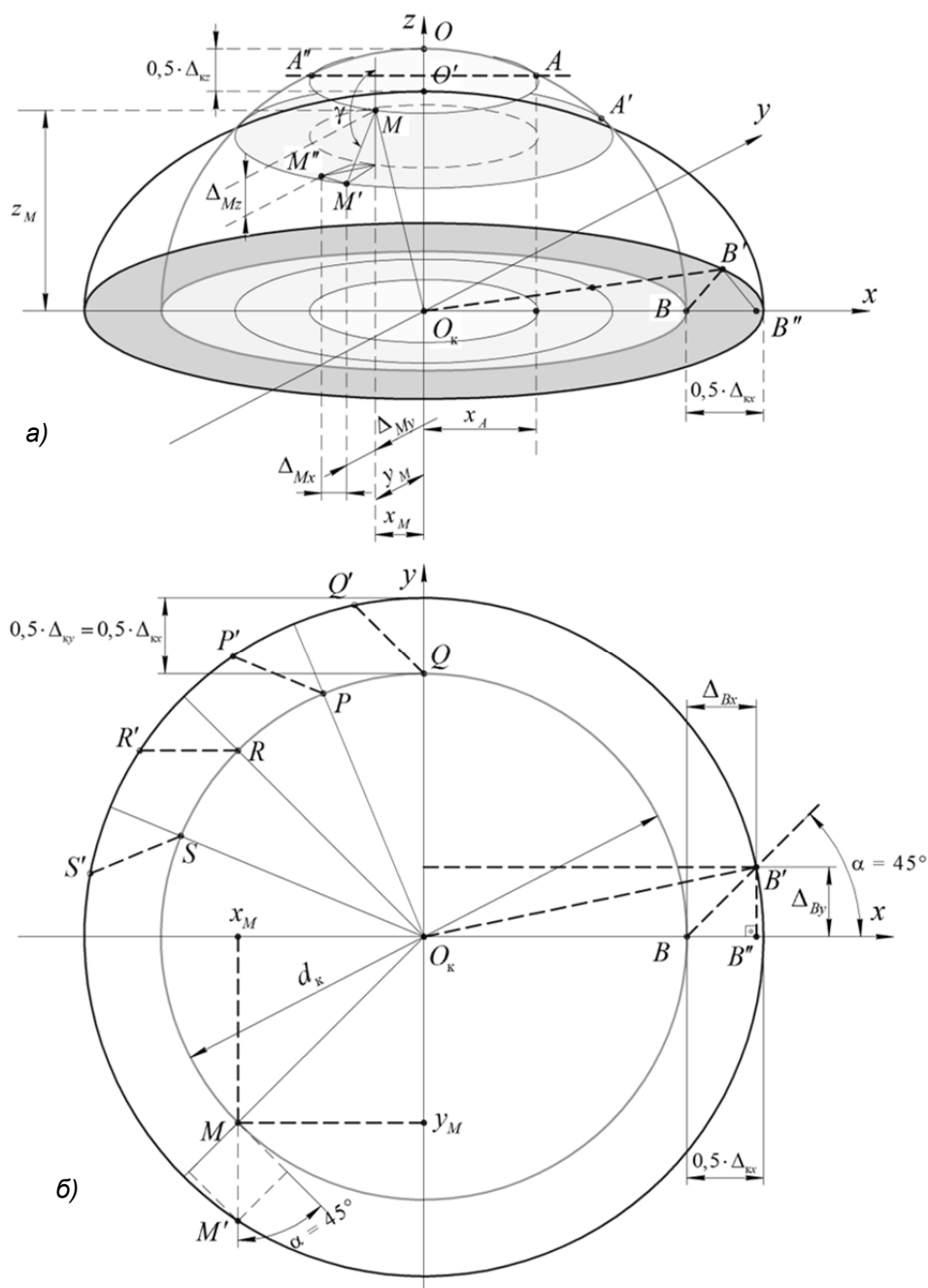


Рисунок 1. — Схема к определению проекций деформаций точек семенной коробочки льна при ее сжатии: а — общий вид деформации точек семенной коробочки льна при ее сжатии; б — вид сверху перехода поверхностных точек диаметрального поперечного сечения шара на его деформированную поверхность (эллипсоид)

При этом точка O переходит вертикально вниз на эту же величину $\Delta_{kz} / 2$ на поверхность эллипсоида. Значит точка O семенной коробочки деформируется в точку $O' (0; 0; \Delta_{kz} / 2)$, а вектором деформации является вектор $\overrightarrow{\Delta_o} = \overrightarrow{OO'} (0; 0; \Delta_{kz} / 2)$ с длиной

$$|\overrightarrow{\Delta_o}| = |\overrightarrow{OO'}| = \sqrt{O^2 + O^2 + \left(\frac{\Delta_{kz}}{2}\right)^2} = \frac{\Delta_{kz}}{2}. \quad (4)$$

Определим проекции и вектора деформаций точек семенной коробочки, лежащих на ее поверхности в плоскости $xO_k y$ (см. рисунок 1). Можно заметить, что в данном случае это точки окружности $x^2 + y^2 = (d_k / 2)^2$, которые в плоскости $xO_k y$ переходят в точки сечения оболочки эллипсоида, который представляет собой окружность, заданную уравнением $x^2 + y^2 = \left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2$. В направлении оси $O_k z$ эти точки перемещений не имеют, т. е. $\Delta_z = 0$.

Для определенности в качестве одной из таких точек можно взять точку B с координатами $(d_k / 2; 0; 0)$ на шаре, которая переходит на эллипсоид в точку $B' (\frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}; \Delta_{By}; 0)$,

где $\frac{\Delta_{Bx}}{2} = \frac{\Delta_{By}}{2}$. Тогда $\Delta_B = \overrightarrow{BB'} (\Delta_{Bx}; \Delta_{Bx} - 0; 0) = (\Delta_{Bx}; \Delta_{Bx}; 0)$.

Тогда с учетом условий (1) и (4) величина вектора деформации в точке B

$$\begin{aligned} |\overrightarrow{\Delta_B}| &= \sqrt{(\Delta_{Bx})^2 + (\Delta_{Bx})^2 + 0^2} = \Delta_{Bx} \sqrt{2}; & |\overrightarrow{\Delta_B}| &= |\overrightarrow{\Delta_o}| \Rightarrow \Delta_{Bx} \sqrt{2} = \frac{\Delta_{kz}}{2} \Rightarrow \Delta_{Bx} = \Delta_{By} = \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}; \\ \cos(\alpha) &= \frac{\Delta_{Bx}}{|\overrightarrow{\Delta_B}|} = \frac{\Delta_{Bx}}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \angle \alpha = 45^\circ; & \cos(\beta) &= \frac{\Delta_{Bx}}{|\overrightarrow{\Delta_B}|} = \frac{\Delta_{Bx}}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \angle \beta = 45^\circ; \\ \cos(\gamma) &= \frac{0}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = 0 \Rightarrow \angle \gamma = 90^\circ. \end{aligned}$$

Можно сделать вывод, что в плоскости $xO_k y$ точки переходят в точки эллипсоида под углом 45° к радиусу точек недеформируемой поверхности (см. рисунок 1, а).

Из этой же схемы (см. рисунок 1, б) можно определить величину Δ_{kx} с точки зрения распространения деформирования. Для этого рассмотрим треугольник $O_k B'' B'$. Он является прямоугольным с гипотенузой $O_k B'$ и катетами $B' B''$, $O_k B''$:

$$O_k B' = \frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}; \quad B' B'' = \Delta_{Bx}; \quad O_k B'' = \frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}.$$

По теореме Пифагора

$$\left(\frac{d_k}{2} + \frac{\Delta_{kx}}{2}\right)^2 = \left(\frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}\right)^2 + \Delta_{Bx}^2.$$

Упростим данное выражение:

$$\Delta_{kx} = \frac{-2d_k + 2\sqrt{d_k^2 + 4\Delta_{Bx}(d_k + \Delta_{Bx})}}{2} = -d_k + \sqrt{d_k^2 + 4\Delta_{Bx}(d_k + \Delta_{Bx})}$$

или

$$\Delta_{kx} = -d_k + \sqrt{d_k^2 + \frac{4\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}} \left(d_k + \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}\right)} = -d_k + \sqrt{d_k^2 + \sqrt{2}\Delta_{kz} \left(d_k + \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}\right)}.$$

Используем полученные результаты для описания проекций вектора деформаций $\overrightarrow{\Delta_M}$ в произвольной точке M , взятой на поверхности недеформированной семенной коробочки льна. Для определенности будем считать, что выбранная нами точка находится в первом октанте ($x_M > 0$; $y_M > 0$; $z_M > 0$), а ее координаты в декартовой пространственной системе, соответственно, равны x_M , y_M , z_M .

Нам известно, что все точки на шаре недеформированной поверхности с аппликатой z_M образуют окружность, которая в проекции на плоскость xO_y будет задаваться уравнением

$$x^2 + y^2 = \frac{d_k^2}{4} - z_M^2.$$

Тогда ордината точки M с ее абсциссой будет связана соотношением

$$y_M = \pm \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - z_M^2 - x_M^2}.$$

В рассматриваемом случае формула (15) примет следующий вид:

$$y_M = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - z_M^2 - x_M^2}.$$

Предположим, что при деформации $\Delta_{kz} / 2$, которую коробочка испытывает в ее верхней точке O и нижней точке O_1 , лежащих на вертикальной оси ее симметрии, выбранная нами точка M переходит в точку M' на деформированную ее поверхность, т. е. эллипсоид, заданный уравнением (2). Пусть точка M' ($x_{M'}$; $y_{M'}$; $z_{M'}$). Тогда проекции вектора деформации на оси пространственной системы координат будут, соответственно, равны $\Delta_{Mx} = x_{M'} - x_M$, $\Delta_{My} = y_{M'} - y_M$, $\Delta_{Mz} = z_{M'} - z_M$.

Направление вектора деформации $\overrightarrow{\Delta_M}$ будет задаваться его направляющими косинусами:

$$\cos(\alpha) = \frac{\Delta_{Mx}}{|\overrightarrow{\Delta_M}|} = \frac{x_{M'} - x_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}; \quad (5)$$

$$\cos(\beta) = \frac{\Delta_{My}}{|\overrightarrow{\Delta_M}|} = \frac{y_{M'} - y_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}; \quad (6)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\Delta_{Mz}}{|\overrightarrow{\Delta_M}|} = \frac{z_{M'} - z_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}, \quad (7)$$

где α , β , γ — углы, образованные вектором $\overrightarrow{\Delta_M}$ с положительными направлениями осей O_kx , O_ky , O_kz соответственно.

Из курса математики [6] известно, что для любого вектора в пространстве

$$\cos^2(\alpha) + \cos^2(\beta) + \cos^2(\gamma) = 1. \quad (8)$$

Используя равенство (8) и равенство $\Delta_{Mx} = \Delta_{My}$ ($\angle\alpha = \angle\beta$), получим

$$\cos(\alpha) = \pm 1 / \sqrt{2} \sin(\gamma).$$

Для выбранной нами точки M можем записать

$$\angle \alpha = \angle \beta = \arccos(1 / \sqrt{2} \sin(\gamma)). \quad (9)$$

С учетом (5)...(7) и (9) можем определить величины проекций деформаций семенной коробочки льна в выбранной точке M :

$$\cos(\alpha) = \Delta_{Mx} / |\overrightarrow{\Delta_M}| \Rightarrow \Delta_{Mx} = \cos(\alpha) \cdot |\overrightarrow{\Delta_M}| = (\Delta_{\kappa z} \sin(\gamma)) / 2\sqrt{2}; \quad (10)$$

$$\cos(\beta) = \Delta_{My} / |\overrightarrow{\Delta_M}| \Rightarrow \Delta_{My} = \cos(\beta) \cdot |\overrightarrow{\Delta_M}| = (\Delta_{\kappa z} \sin(\gamma)) / 2\sqrt{2}; \quad (11)$$

$$\cos(\gamma) = \Delta_{Mz} / |\overrightarrow{\Delta_M}| \Rightarrow \Delta_{Mz} = \cos(\gamma) \cdot |\overrightarrow{\Delta_M}| = 0,5\Delta_{\kappa z} \cos(\gamma). \quad (12)$$

Равенства (10)...(12) показывают, что все точки с аппликатай z_M на поверхности недеформированной семенной коробочки подчиняются общему закону деформации, зависящему от величины $\Delta_{\kappa z} / 2$ и угла, образованного вектором деформации с положительным направлением оси $O_{\kappa z}$.

Причем это хорошо вписывается в теорию уже рассмотренных случаев. Тогда получим:

– при $\gamma = 180^\circ$ $\Delta_{Oz} = \Delta_{\kappa z} / 2$; $\Delta_{Ox} = 0$; $\Delta_{Oy} = 0$;

– при $\gamma = 90^\circ$ $\Delta_{Bz} = 0$; $\Delta_{Bx} = \Delta_{\kappa z} / 2\sqrt{2}$; $\Delta_{By} = \Delta_{\kappa z} / 2\sqrt{2}$.

Также можно спрогнозировать, что, например, при $\gamma = 135^\circ$ получим $\Delta_{Lz} = -\Delta_{\kappa z} / 2\sqrt{2}$; $\Delta_{Lx} = \Delta_{\kappa z} / 4$; $\Delta_{Ly} = \Delta_{\kappa z} / 4$ и т. д.

С учетом (10)...(12) точка M на деформируемую поверхность перейдет в точку M' со следующими координатами:

$$x_{M'} = x_M + \Delta_{Mx} = x_M + (\Delta_{\kappa z} \sin(\gamma)) / 2\sqrt{2}; \quad (13)$$

$$y_{M'} = y_M + \Delta_{My} = y_M + (\Delta_{\kappa z} \sin(\gamma)) / 2\sqrt{2}; \quad (14)$$

$$z_{M'} = z_M + \Delta_{Mz} = z_M + (\Delta_{\kappa z} \cos(\gamma)) / 2. \quad (15)$$

Так как $x_{M'}$, $y_{M'}$, $z_{M'}$ лежат на эллипсоиде, то подчиняются равенству (3), из которого с учетом (13)...(15) можно определить величину угла γ , а значит, деформации и механическое напряжение в любой точке семенной коробочки льна при ее поперечном сжатии. Это, в свою очередь, позволит установить предельные механические напряжения для разрушения семенной коробочки и выделения из нее семян.

Для этого достаточно рассмотреть семенную коробочку льна как упругое тело. При поперечном сжатии условием ее разрушения является $|\overrightarrow{N_6}| > |\overrightarrow{F_{\text{упр}}}|$, где $|\overrightarrow{N_6}|$ — величина силы сжатия семенной коробочки бичом, Н.

При этом, согласно закону Гука, для упругого тела величина силы упругости определяется формулой [7; 8]

$$|\overrightarrow{F_{\text{упр}}}| = ES \frac{\Delta l}{l}, \quad (16)$$

где E — модуль Юнга (упругости материала), Па;

S — площадь поперечного сечения, м^2 ;

Δl — величина поперечного сжатия тела, м;

l — линейная величина, определяющая исходное состояние тела, м.

В дифференциальной форме этот закон в точке рассматриваемого материала имеет следующий вид [7; 8]:

$$\sigma_i = E\varepsilon_i, \quad (17)$$

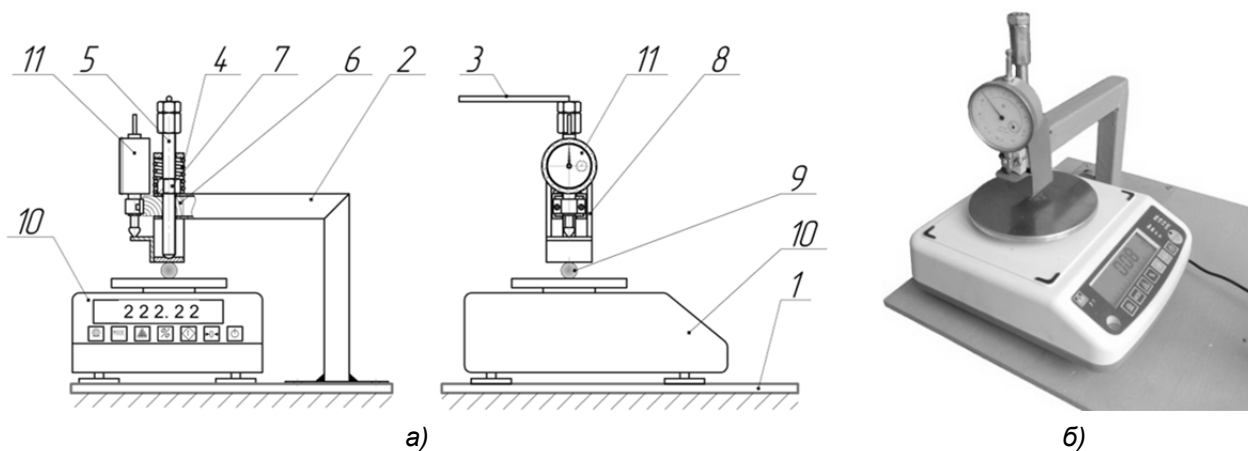
где $\sigma_i = \overline{F_{\text{упр}}} / S_i$ — механическое напряжение в точке, Н / м²;

$\varepsilon_i = \Delta l_i / l$ — величина поперечного сжатия тела в точке.

Физический смысл формулы (17) заключается в том, что механическое напряжение в точках деформируемого тела прямо пропорционально относительному его сжатию с коэффициентом пропорциональности, равным модулю упругости материала данного тела.

Рассматривая формулу (17) применительно к случаю сжатия семенной коробочки льна в целях ее разрушения, можно сделать вывод, что величина механических напряжений в точках коробочки зависит от исходного его состояния ($l = d_k$) и формы (2), ее деформаций в точках, определяемых зависимостями (10) и (11), и формы деформированной поверхности (3). Неизвестной величиной в формулах (16) и (17) является модуль Юнга семенной коробочки льна, который характеризует ее упругие свойства и может быть определен только опытным путем. Экспериментальное определение данного параметра позволит моделировать процесс сжатия и разрушения семенной коробочки льна, а также обосновать рациональную величину зазора между эластичным рабочим органом и сепарирующей решеткой обмолачивающих устройств предлагаемого типа.

Для определения величины упругой деформации, величины деформации коробочки льна при ее разрушении и значений величин сил сжатия при поперечной деформации коробочки, а также модуля Юнга была изготовлена лабораторная установка (рисунок 2). Она представляет собой плиту 1, на которой жестко смонтирована стойка 2 с механизмом разрушения коробочек. Механизм разрушения состоит из рукоятки 3, винта 5 и подпружиненного пружиной 4 ползуна 8, имеющего отполированную рабочую поверхность. Для плавности хода винта 5 установлена упругая резьбовая вставка 6. На плиту 1 под раздавливающий механизм устанавливались весы лабораторные ВК-600 таким образом, чтобы приложение силы разрушения коробочки льна приходилось в центр тарелки весов. Для определения величины смятия коробочки льна на стойке 2 жестко закреплен индикатор часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм, измерительный стержень которого упирается в полку ползуна 8.



1 — плита; 2 — стойка; 3 — рукоятка; 4 — пружина; 5 — винт; 6 — резьбовая упругая вставка; 7 — гайка; 8 — ползун; 9 — коробочка льна; 10 — весы; 11 — видеокамера

Рисунок 2. — Устройство для определения усилия разрушения и величины деформации коробочек льна: а — схема устройства; б — общий вид устройства

Опыты проводили следующим образом. Коробочка льна, диаметр которой предварительно определялся с помощью цифрового штангенциркуля ШЦЦ-I, укладывалась по центру тарелки весов 10, а раздавливающий механизм относительно коробочки располагался так, чтобы ось вращения винта 5 находилась в центре коробочки. При вращении рукоятки 3 винт 5 совершает перемещение по оси вниз и воздействует на ползун 8, который, преодолевая усилие пружины 4, движется в направлении коробочки льна 9. В момент касания рабочей поверхностью ползуна 8 коробочки 9 индикаторная шкала весов отображает усилие, действующее на коробочку льна 9, в этот момент шкалу индикатора ИЧ-10 устанавливали на ноль. В дальнейшем производили сжатие коробочки с шагом 20 мкм и фиксированием силы сжатия в каждом из 14 положений. Также фиксировались значения силы сжатия и величины деформации коробочки в момент ее разрушения. Исследованию подвергались 50 семенных коробочек льна различного диаметра.

Для определения усилия разрушения были заготовлены опытные образцы льна из рулонов льнотресты ОАО «Горкилен» сорта Грант. В исследованиях использовались только целые (нераскрывшиеся) семенные коробочки льна влажностью 12...14 %.

Модуль Юнга материала семенной коробочки льна на основании (16) определяли по зависимости

$$E = \frac{F_{\text{упр}} d_k}{S \Delta_{\text{кз}}}, \quad (18)$$

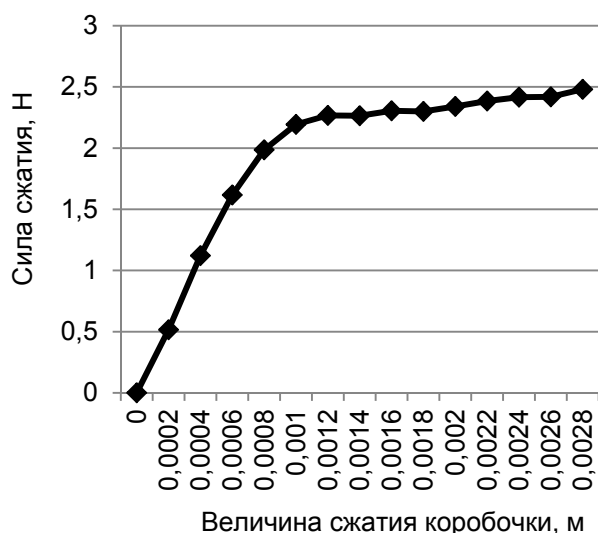
где $F_{\text{упр}}$ — сила упругого сжатия коробочки льна, Н;

d_k — диаметр семенной коробочки льна, м;

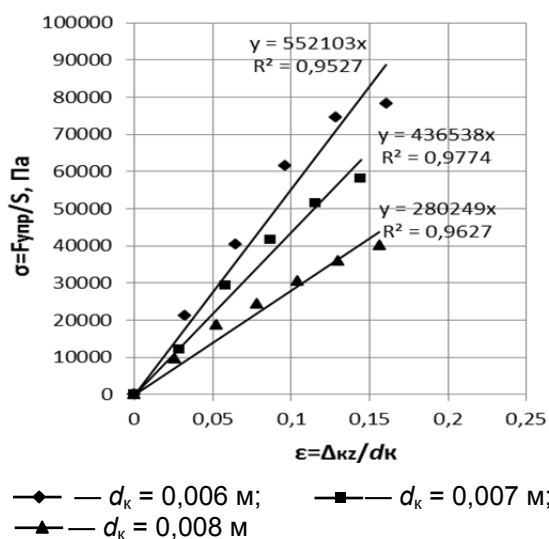
S — площадь поперечного сечения семенной коробочки льна, м²;

$\Delta_{\text{кз}}$ — величина поперечного сжатия семенной коробочки льна, м.

В результате проведенных исследований по определению деформаций семенной коробочки льна были получены данные, определяющие взаимосвязь величины сжатия (поперечной деформации $\Delta_{\text{кз}}$) семенной коробочки льна и величины силы сжатия F при этом для различных диаметров семенных коробочек льна. На основании полученных данных для средних значений величин деформации и сил сжатия получена графическая зависимость (рисунок 3, а).



а)



б)

Рисунок 3. — Результаты исследования деформации семенной коробочки льна: а — изменение силы сжатия коробочки от величины сжатия; б — условная диаграмма участка упругости семенной коробочки при различных ее диаметрах для определения модуля Юнга

Анализируя графическую зависимость (см. рисунок 3, а), можно заметить, что на участке сжатия семенной коробочки льна от 0 до 0,0008 м происходит ее упругая деформация. При освобождении семенной коробочки от воздействия приложенной нагрузки на данном участке она принимает свою первоначальную форму. На участке сжатия семенной коробочки льна 0,0008...0,001 м происходит ее разрушение, а дальнейшая деформация сопровождается незначительным снижением силы сжатия. После того как семенная коробочка льна разрушена, ее поперечная деформация сопровождается повторяющимися циклами: незначительным нарастанием сопротивления сжатию, разрушением оболочки и снижением силы сжатия. Циклы нарастания и снижения силы сжатия связаны с морфологией семенной коробочки льна, т. е. наличием в ней семенных гнезд и полугнезд. Диапазон колебания силы сжатия при этом изменяется в пределах от 2,25 до 2,50 Н.

Полученные линейные зависимости (см. рисунок 3, б) с достаточно высокой достоверностью описывают зависимость σ от ε , для семенных коробочек диаметром до 0,006 м коэффициент детерминации $R^2 = 0,95$, для семенных коробочек диаметром 0,007 м коэффициент детерминации $R^2 = 0,98$, а для семенных коробочек диаметром до 0,008 м коэффициент детерминации $R^2 = 0,96$.

На основании формулы (18) установлено, что модуль Юнга для семенной коробочки льна с размерами $d_k = 0,0056...0,0078$ м изменяется от $0,00028 \cdot 10^9$ до $0,00055 \cdot 10^9$ Па, при этом экспериментально определено, что величина ее поперечной деформации $\Delta_{кз}$ до разрушения составляет от 0,0006 до 0,0022 м.

Заключение. В результате анализа деформации семенной коробочки льна при ее поперечном сжатии получены аналитические зависимости для определения угла, задающего направление вектора деформации в любой точке ее поверхности, а также величин проекций деформаций точек, лежащих на поверхности семенной коробочки льна. С учетом упругих свойств семенной коробочки льна данные зависимости позволяют установить предельные механические напряжения для разрушения семенных коробочек и выделения из них семян.

Разработана методика, а также проведены экспериментальные исследования по определению величины упругой деформации семенной коробочки льна и характера ее разрушения. Установлена величина упругой деформации семенной коробочки льна. Получены данные, определяющие взаимосвязь величины сжатия семенной коробочки льна и значений силы сжатия при этом для различных диаметров семенных коробочек льна. Определены значения зависимости механического напряжения, возникающего в семенной коробочке, от ее относительной деформации. Расчетные значения величин модуля Юнга для семенных коробочек диаметром 0,0056...0,0078 м составляют $0,00028 \cdot 10^9...0,00055 \cdot 10^9$ Па. Установлены значения предельной величины сжатия семенной коробочки 0,0006...0,0022 м, определяющей момент ее разрушения.

Список цитированных источников

1. Анализ устройств для отделения семян льна от стеблей / В. А. Шаршунов [и др.] // Вестн. БГСХА. — 2017. — № 4. — С. 174—180.
2. Устройство для отделения семенных коробочек от стеблей льна : пат. 7224 Респ. Беларусь : МПК А 01F 11/00 / В. Е. Круглень, М. В. Лёвкин, В. И. Коцуба, С. Н. Крепочин, В. А. Левчук ; заяв. Белорус. гос. с.-х. акад. ; № u 20100607 ; заявл. 06.07.10 ; дата публ.: 02.02.2011 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. — 2011. — № 2. — С. 154.
3. Устройство для выделения семян из ленты льна : пат. 8183 Респ. Беларусь : МПК А01D 45/06 / В. Е. Круглень, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук ; заяв. Белорус. гос. с.-х. акад. ; № u 20110743 ; заявл. 29.09.2011 ; дата публ.: 30.04.2012 // Афіц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлект. уласнасці. — 2012. — № 2. — С. 197.
4. Исследование обмолачивающего устройства в линии первичной переработки льна / В. А. Шаршунов [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. — 2015. — № 3. — С. 112—117.

5. Курзенков, С. В. Моделирование деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой в процессе обмолота / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестн. БГСХА. — 2022. — № 1. — С. 142—147.
6. Воднев, В. Т. Основные математические формулы : справочник / В. Т. Воднев, Н. Ф. Наумович, А. Ф. Наумович ; ред. Ю. С. Богданов. — 3-е изд., перераб. и доп. — Минск : Выш. шк., 1995. — 380 с.
7. Математическая физика : энциклопедия / Рос. фонд фундамент. исслед. ; редкол.: Л. Д. Фадеев [и др.]. — М. : Большая рос. энцикл., 1998. — 691 с.
8. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. — 4-е изд. перераб. — М. : Наука, 1968. — 940 с.

Поступила в редакцию 22.03.2022.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Научная концепция журнала предполагает публикацию современных достижений в области технических наук; представление результатов фундаментальных и прикладных исследований, а также результатов, полученных в производственных условиях областей, включая результаты национальных и международных исследований. Статьи аспирантов, докторантов и соискателей последнего года обучения публикуются вне очереди при условии их полного соответствия требованиям, предъявляемым к научным публикациям.

Публикация статей в журнале бесплатная на основании заключённого договора о передаче исключительных прав на объект авторского права (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Статьи принимаются на русском, белорусском и английском языках.

Подробные правила для авторов представлены на официальном сайте БарГУ (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

The scientific strategy of the journal suggests publishing modern achievements in the fields of Engineering sciences; presentation of the results of fundamental and applied research, as well as the results obtained under production conditions, both at the domestic and international level. Articles by postgraduate and doctoral students in their final year of traineeship are published out of turn if they are written in strict conformity with the specified requirements.

Publication of articles is free of charge in accordance with the existing contract on transfer of authority to the subject matter of copyright (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).

Articles can be written in the Russian, Belarusian or English languages.

More detailed instructions for authors can be found on the official website of BarSU (URL: <http://www.barsu.by/publishing/vestnik.php>).